

Title	テラヘルツ波帯におけるスーパーオシレーション効果 を利用した超集光技術に関する研究		
Author(s)	射庭,彩人		
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文		
Version Type	VoR		
URL	https://doi.org/10.18910/98624		
rights			
Note			

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

博士学位論文

テラヘルツ波帯における

スーパーオシレーション効果を利用した

超集光技術に関する研究

2024年2月

射庭 彩人

大阪大学大学院工学研究科 電気電子情報通信工学専攻

目次

第1章	序論
1.1	テラヘルツ波とは3
1.2	テラヘルツ波の集光技術に関する現状と課題4
1.3	本論文の構成
参考文	献
第2章	スーパーオシレーション9
2.1	スーパーオシレーションの歴史9
2.2	スーパーオシレーションの原理10
参考文	献13
第3章	テラヘルツ波帯に向けたスーパーオシレーションレンズの作製と評価14
3.1	はじめに14
3.2	テラヘルツスーパーオシレーションレンズの設計手法15
3.3	Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) について
3.4	テラヘルツスーパーオシレーションレンズの設計と製作について
3.5	テラヘルツスーパーオシレーションレンズの評価系22
3.6	スーパーオシレーションレンズの評価結果と考察24
3.7	まとめ
参考文	献
第4章	1 軸方向に集光するテラヘルツスーパーオシレーションレンズの作製と評価30
4.1	はじめに
4.2	テラヘルツシリンドリカルスーパーオシレーションレンズの設計31
4.3	テラヘルツシリンドリカルスーパーオシレーションレンズの集光性能34

4.4 テラヘルツシリンドリカルスーパーオシレーションレンズの製作	4.4
4.5 テラヘルツシリンドリカルスーパーオシレーションレンズの集光性能評価の結	4.5
果と考察40	果とネ
4.6 まとめ	4.6
参考文献	参考了
第5章 メタマテリアル型のテラヘルツスーパーオシレーションレンズの作製と評価.44	第5章
5.1 はじめに44	5.1
5.2 微細な周期構造を利用したスーパーオシレーション効果に関する先行研究44	5.2
5.3 メタマテリアル型テラヘルツスーパーオシレーションレンズのパターン設計.46	5.3
5.4 設計したメタマテリアル型テラヘルツスーパーオシレーションレンズの製作と	5.4
性能の評価	性能の
5.5 まとめ	5.5
参考文献	参考了
第6章 総括60	第6章
研究業績	研究業績
謝辞	謝辞

第1章 序論

1.1 テラヘルツ波とは

周波数が 0.1~10 THz(波長 3 mm~30 µm)の電磁波はテラヘルツ(THz)波と呼ばれ、 電波と光の中間の領域に位置している。図 1.1 は周波数(波長)と、各波長に対応する物 質の状態を示した図である。テラヘルツ波は電波の物質を透過する特性と光波の指向性の 双方の特性を併せ持つことで知られており、また分子間の相互作用[1]、プラズマ振動、フ ォノン、分子の回転遷移等、物質の様々な励起の周波数に対応していることから物質の解 析に有用であることが知られている。これらの特徴を活かして分光測定に応用し、医薬品 [2]、危険物検知[3]、美術品の解析[4]等さまざまな分野への応用が進められている。特に 近年では通信用途において 5G や 6G といった次世代の通信規格にこれらの周波数帯が使わ れることが決まっており、この分野に関する技術開発が盛んに行われている[5-9]。この周 波数帯は X 線同様に透過性が高いものの、X 線よりも人体への影響が小さいため、セキュ リティ面での活躍も期待されている[10]。他にも医療分野ではがん細胞の検出に関する研 究にも取り組まれている[11]。

これら以外の分野として工業分野における製品検査への応用にも期待されている。例え ば樹脂製品の検査において、従来は近赤外線(周波数 214~400 THz、波長 1400~750 nm) が主に利用されており、この波長帯では分子単体の振動に対応した波長の吸収を計測し製 品の性質を計測することができた。これが THz 波帯になると分子単体の振動ではなく、分 子が複数つながりあったより大きな高分子としての高次構造に起因する吸収スペクトルを 観測することができる。この高分子による吸収を計測することで今まで把握できていなか った物性を管理できる可能性を秘めている。実際に検査として THz 波を利用する際には、 事前に計測したい物性に高い寄与を持つ周波数帯を特定しておく必要がある。そのうえで



図1.1 電磁波の周波数と対応する現象

特定した周波数の単一でコヒーレントな THz 波発振器を用いて評価を行う[12]。THz 波帯 は水分子に高い吸収率を持っており、この特性を活かすことで水分量に起因する製品欠陥 や品質の評価に応用できることも期待されている[13]。製造工程では製品に想定以上の水 分が含まれてしまうと成型、機能発現に大きく影響することもあり、THz 波を使って非接 触で水分量を計測することで品質管理に応用できる可能性がある。他にも塗装膜の内部に 異物や欠陥があった場合に、通常の可視光カメラでは見えないが、THz 波で検査すること で正確に膜内部の検査ができるという報告もされている[14]。

樹脂製品のなかには金属異物が製品品質に大きく影響するものがあり、そのため工程内 の金属検査は重要性が高い。インライン金属検知装置としては X 線、磁気を利用したもの が一般的である[15]。しかし、磁気方式は非磁性金属に対して感度が低いというデメリッ トがあり、フィルム状製品向け検査機の検出下限は磁性金属で φ300 µm、非磁性金属の場 合 φ600 µm が検出の限界である[16]。一方、 THz 波は X 線同様に樹脂に対して高い透過性 を持つが、X 線と異なり人体に無害である点、また磁性・非磁性問わず金属に対して高い 反射率を持つため新たな検査方式として期待されている[17]。

このように THz 波帯はこれまで一般的に使用されてきた近赤外線や可視光と異なるユニ ークな特徴を持ち、これを利用することで従来手法とは違った計測ができるためその実用 化が大きく期待されている。

1.2 テラヘルツ波の集光技術に関する現状と課題

様々な用途での応用が期待されている THz 波計測だが可視光や近赤外線に比べ波長が長 いため 計測の"空間分解能"を小さくすることが難しいという課題がある。計測の空間分解 能を上げる手段の 1 つとしてレンズを使って狭い領域に電磁波を集める方法がある。しか し従来のレンズを使って集光できるスポットの大きさには限界(下限)があり、これはレ イリーの回折限界と呼ばれ以下の式がよく知られている。

$$d = \frac{0.61\lambda}{NA} \tag{1}$$

d は回折限界(スポット径の下限)、 λ は波長である。 θ はレンズの径と焦点距離で決まる 角度である。NA はレンズの開口数(Numerical Aperture)でありNA=nsin θ で表現される。 図1.2はレンズを電磁波(平面波)が通過し、1点に集光する様子を図示したものであり、 θ の定義も図示している。n は媒質の屈折率であるため、空気中で使用する場合はn=1と なる。 理論的にはNA が n=1、 θ =90°のときに最大 NA=1となり d は波長の約半分程度 までが限界といえるが、現実的には θ =90°にすることは困難であり、市販されている一 般的な光学レンズではNA=0.5~0.7程度に留まっている。顕微鏡用途として計測したい試 料とレンズの間にイマージョンオイルで満たすことでNA>1の条件を作り出し、試料表面 からの反射を抑えるとともに NA を改善することでより小さな分解能を実現する方法もあ



図 1.2 レンズの開口数

る。しかし、これは試料もしくはカバーガラスにイマージョンオイルが付着しても問題な い場合、かつレンズを試料から近い距離に設置できる場合に限定されるため汎用性が低い。

THz 波帯の回折限界を超える超分解能に関する従来研究としては、例えば負の屈折率を 実現したスーパーレンズ[18]や THz- scanning near field optical microscopy (THz-SNOM) [19]、 Bull's eye Lens[20]、がある (図 1. 3)。Nikollao ら[19]は図 1. 3(a)のようにマイクロスコー ププローブを利用して超分解能実現にアプローチしている。THz-QCL から 3.45 THz (λ = 87 µm)の THz 波を計測対象に照射し、計測対象表面から近接場の距離にプローブを近づ ける。プローブと計測対象表面に偏在しているエバネッセント波が作用することで伝搬波 に変換され、THz 波を入射した経路を逆に経由することで受信している。この時の分解能 はプローブの先端サイズに依存し、文献では 35 nm の非常に小さな分解能を実現している。 また図 1. 3(b)のように同心円状の金属パターン (Bull's eye lens)を利用する方法もある。 等間隔に円形のパターンがレンズ表面上に施されており、中央部分には波長よりも小さな



図 1.3 THz 波帯の超集光に関する研究まとめ、(a) プローブを利用して表面からのエバネ ッセント波を計測[19]、(b)ブルズアイ構造によって表面プラズモンを利用した超集光 [20]

穴が開いている。THz 波をこの構造に入射すると、溝によって表面プラズモンが金属層平 面方向に伝搬する。これにより中央部分の穴に電場が集中し、波長よりも直径が小さな穴 を通過、THz 波を入射した面の裏側に小さな集光点が生成される。

ここまで説明してきた超分解能に関する先行研究ではエバネッセント波を利用している。 エバネッセント波を利用する手法は、回折限界を超えて小さなスポットを生成できるが、 その性質上レンズ近傍の近接場にしかスポットを生成できないという制限がある。THz 波 を用いた計測技術の普及・実用化を目指したとき、スポットが生成できる距離(焦点距離) がレンズ近傍に制限されてしまうと適用できる分野・範囲も大きく制限されてしまう。ま た超分解能に関する従来研究は顕微鏡のような静止した環境下での使用を想定したものが 多く焦点深度(Depth of focus (DOF))が極端に短いものが多い。実用化を目指したとき 通常の計測環境でも計測対象のブレや多少の位置変動に対してのロバスト性があることが 望ましい。

ちなみに THz 波帯の超集光技術を研究するにあたっては、多少のロスがあっても従来の 限界より小さな範囲に集光できる方が好ましい。集光のための要素でエネルギーロスが発 生したとしても、発振器の出力を上げる、受信機の感度を上げる等対策をとることができ るが、計測分解能を向上させるためには集光技術の改善に取り組むしかない。

そこで本研究では目標として、回折限界以下の集光サイズ、Far-field の焦点距離、長い DOF、これら3つの条件を満たす THz 波帯の集光技術について、これまで THz 波帯の集光 技術では使われてこなかった"スーパーオレーション"と呼ばれる現象を使ったレンズを 様々な条件、形状で設計開発・評価することで、THz 波帯の計測技術の普及加速を目指す。

1.3 本論文の構成

本論文は全6章で構成される。各章の概要は以下のとおりである。

第2章では本研究で注目したスーパーオシレーション(Super-oscillation)[21]と呼ばれる 物理現象の歴史と原理について記述する。帯域制限された関数において局所的にその最高 のフーリエ周波数成分よりも高い周波数成分をもつ特性を持った関数をスーパーオシレー ション関数と呼ぶ。物理的に帯域制限された系においても、例えば光や電波のような波に 対して同様に局所的にフーリエ周波数成分を大きく外れて高い周波数成分を生じさせるこ とが出来る。本研究において重要なこの物理現象について述べる。第3章以降では、スー パーオシレーションを応用した新しいTH波帯のレンズについて、目的に応じた3種類の異 なるタイプのレンズを製作・評価を実施、考察する。

第3章では同心円型のTHz波向けスーパーオシレーションレンズ(Super-oscillatory lens、 SOL)について述べる。従来研究では主に紫外(UV)・可視光の顕微鏡用途としてSOLの 研究が報告されており、THz 波帯への応用はこれまであまりされてこなかった[22,23]。私 は SOL を THz 波向けに設計製作し、実験にてその性能を実証した[24-26]。このタイプの特 徴は、任意の焦点距離において1点の回折限界以下の極小のスポットを実現するとともに、 長い焦点深度も維持することができる点にある。本研究ではTHz波帯の範囲である 0.1 THz (λ=3 mm)向けに同心円型のメタルスリットを利用して SOLを設計した。レンズ径を100 mm、焦点距離を 75 mm として設計し、フォトリソグラフィによってガラス基板の上に金 属薄膜のパターンを蒸着することで製作している。また、その性能を評価するため、分解 能評価用のサンプルを製作し、計測分解能の評価を実施した。結果、1.5 mm (0.5λ)の幅 のパターンに対するクリアなイメージング結果を実験的に確認できた[24]。

第4章では1軸方向にのみ集光する THz - Cylindrical Super-oscillatory lens (THz-CSOL) の開発について述べる。このレンズはラインアンドスペースの金属パターンによって一定 の方向にのみスーパーオシレーション効果を発現する。計算によって回折限界以下の集光 ができること、合わせて焦点距離が 10 mm 以上、DOF が 5 mm 以上であり目標の全ての条 件を満たしていることを確認した。また焦点距離 50 mm、100 mm の焦点距離が異なる 2 種 類の THz-CSOL を設計製作、実験にて回折限界以下の集光能力があることを確認した[25]。

第5章ではメタマテリアル型のTHz-SOLの開発について述べる。このレンズの特徴は波 長以下の構造をレンズ面内に周期的に配置したメタマテリアルベースのTHz-SOLであり、 レンズ面内に複数の極小スポットを生成できる。この特徴を利用することで面内を多点同 時計測できると考えた。本研究では円形のスリット5個を十字に並べたものを単位パター ンとし、これを同一レンズ面内に並べることで単位パターン毎に焦点を生成させることが できる。このときの焦点のサイズは回折限界以下のサイズを実現しており、これにより多 点を同時に高分解能で計測できるようになる。このレンズについての設計製作、評価結果 について述べる[26]。

最後に第6章にて本論文の総括を行い、用途に合わせた3種類のTHz-SOLを開発して得られた主要な結果と将来の展望について述べる。

参考文献

- [1] N. Nagai *et al.*, Chem. Phys. Lett. **413**, 4, 495-500 (2005).
- [2] D. M. Charron et al., Analytical Chemistry, 85, 4, 1980-1984 (2013).
- [3] J. Wang *et al.*, Journal of The Electrochemical Society, IOP Publishing, Technical report, **168**, 117517 (2021).
- [4] K. Fukunaga *et al.*, Applied Physics A, **122**, 2, 106 (2016).
- [5] R. Bin Sulaiman et al., IUP Journal of Telecommunications, 13, 2, 7 (2021).
- [6] A. Al-Hourani et al., Academic Press Library in Signal Processing, 7, 317-363 (2018).
- [7] M. Fujita, 8th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science, Hanoi, Vietnam, 348-351 (2021).

- [8] J. Wei et al., arXiv preprint, 2307, 10321 (2023).
- [9] C. -X. Wang et al., in IEEE Vehicular Technology Magazine, 16, 4, 27-37 (2021).
- [10] Y. Takida et al., Opt. Express 29, 2, 2529-2537 (2021).
- [11] Y. Peng et al., BME Frontiers, 2020, 1-11, (2020).
- [12] 北村 文乃, 他, 電気学会論文誌A(基礎·材料·共通部門誌), 143, 5, 180-185 (2023).
- [13] H. Ge et al., Int. J. Mol. Sci. 24, 13, 10936 (2023).
- [14] H. Feddal et al., Microwave and Optical Technology Letters, 60, 10, 2429-2437 (2018).
- [15] 植山 英弘, 包装技術, 46, 10, 808-812 (2008).
- [16] アンリツ株式会社, https://www.anritsu.com/ja-jp/infivis/products/metal-detection/high-sensitivity, (2023).
- [17] N. Palka et al., Terahertz Science and Technology, 6, 1, 99-107 (2016).
- [18] J. B. Pendry, Phys. Rev. Lett., 85, 18, 3966-3969 (2000).
- [19] N. Sulollari et al., APL Photonics, 6, 6, 066104(2021).
- [20] D. A. Naylor *et al.*, 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves, Hong Kong, China, 1-2 (2015).
- [21] G. Chen et al., Light Sci Appl., 8, 56 (2019).
- [22] G. Yuan et al., Light Sci. Appl., 6, e17036 (2017).
- [23] D. Tang et al., Opt. Express, 27, 9, 12308-12316 (2019).
- [24] A. Iba et al., Opt. Lett., 46, 19, 4912-4915 (2021).
- [25] A. Iba et al., Sensors, 21, 20, 6732 (2021).
- [26] A. Iba et al., Appl. Sci., 12, 24, 12770 (2022).

第2章 スーパーオシレーション

2.1 スーパーオシレーションの歴史

これまで THz 波帯でビームを集光する手段としては高密度ポリエチレン (HDPE) やテ フロンを加工したレンズを用いられることが一般的であった。これらのレンズを使うとビ ームはレンズの形状によって決まる焦点距離 1 点に集光され、このスポットの大きさの限 界が第1章で記述した回折限界である。この回折限界に縛られない手法として"スーパーオ シレーション"と呼ばれる現象に注目した。

帯域制限された関数が、最も高いフーリエ成分よりも局所的に高く振動することがあり、 この現象自体は情報理論や光学など様々な分野で以前から知られていた[1-10]。この現象 が"スーパーオシレーション"と呼ばれる現象である。最初は量子力学の分野において弱測 定時に観測対象が発するスペクトルが予想から外れた周波数が計測されたことをきっかけ にして[11]、次第にレーダーや光学の分野でも研究が取り組まれるようになり、現在関連 分野への応用に広がりつつある。

第二次世界大戦中にはマイクロ波アンテナに関する研究でスーパーオシレーションが取 り扱われている。任意の狭い領域に複数の放射素子を配置し、その放射パターンがレイリ ー回折限界よりも狭い角度幅のプロファイルを持つビームを生成するレーダーアンテナを 設計できることが実証されており、このアンテナの「超指向性」や「超利得」といった特 性が実現できる原理が、スーパーオシレーションによるものである。しかし、この超指向 性にはデメリットもあり、現実的に活用できるビーム強度を実現するには個々の素子を非 常に強く発振しなければならなかった。そのうえ遠方界に到達する細いビームよりも近傍 界が指数関数的に強くなってしまうという欠点があり、その使い勝手の悪さから長い間実 用化されてこなかった[12]。

また次にToraldoが光学分野でも応用できることに気づき、アッベの分解能限界を超える 超解像顕微鏡実現のため、焦点距離が非常に小さいレンズを提案している[13]。当時の技 術ではこのレンズを製作するための微細な加工が難しかったため製作するには至らなかっ たが、現在では加工技術も発達し、超解像顕微鏡として実用化されつつある[14]。その後、 2006 年には Berry と Popescu は光学分野の超解像への応用を提案している[15]。彼らは波長 より小さな構造を持つ回折格子にコヒーレント光を入射し、通過した光の強度分布がエバ ネッセント波を使用することなく波長より小さな強度分布を保ったまま伝播できることを 理論的に証明した。同時期に、コヒーレント光を照射したナノホールのアレイ上を波長よ り小さなアパーチャーを走査することで、波長以下の大きさのホットスポットが生成され ていることが実験的に確認されている[16,17]。このようにスーパーオシレーションは量子 力学の分野に端を発し、可視光におけるサブ波長イメージングに応用されるようになって いったが、THz 波帯でのレンズ応用についてはまだ本格的な取り組みがされていなかった。

2.2 スーパーオシレーションの原理

2.1 でも触れた通り、帯域制限された関数のなかで局所的にその関数に含まれるフーリエ 成分以上に高い周波数成分を持つ関数のことをスーパーオシレーション関数と呼ぶ。

Berry らはスーパーオシレーションの光学的超解像への応用に対し、次のような形でスー パーオシレーション関数を表現している[15]。

$$f(x) = (\cos x + ia \sin x)^N \qquad (a > 1, N \gg 1)$$
(2)

f(x)は1次元の周期関数であり、x は実数の変数、a はスーパーオシレーション関数 f(x)の周期を表現する係数、N は次数である。a = 1の場合、 $f(x) = \exp(iNx)$ となり平面波を表す式となる。一方 a > 1の場合、f(x)は周期 π の周期性を持ち、x = 0付近の振幅の周期が高く以下の数式で表すことができる。

$$f(x) \approx \exp(N\log(1+iax)) \approx \exp(iaNx)$$
(3)

この関数は最大波数 N を持つ帯域制限関数であり、そのフーリエ級数からわかるように

$$f(x) = \sum_{n=0}^{N} c_n \exp(iNk_n x)$$
(4)

と表現できる。フーリエ級数の展開係数を cn とした時、式(2)の二項展開から得られ、式(5)のように表される。

$$c_n = \frac{N!}{2^N} (-1)^n \frac{(a^2 - 1)^{N/2} [(a - 1)/(a + 1)]^{Nk_n/2}}{[N(1 + k_n)/2]! [N(1 - k_n)/2]!}$$
(5)

また $k_n = 1-2n / N$ であるから $|k_n| \le 1$ であり、これは式(3)がスーパーオシレーションの挙動を説明しているとともに、スーパーオシレーションの度合いを a によって表現している。

また Berry らはより詳細にスーパーオシレーションを理解するため、f(x)を式(6)、k(x)を式(7)としても表現している。

$$f(x) = \left(\frac{a}{k(x)}\right)^{N/2} \exp\left\{iN\int_0^x dx'k(x')\right\}$$
(6)

$$k(x) \equiv \frac{1}{N} Im\partial_x \log f(x) = \frac{a}{\cos^2 x + a^2 \sin^2 x}$$
(7)

波数 k(x)はスーパーオシレーション領域の k(0) = aから最も遅い波数 $k(\pi) = 1/a$ まで変化する。このとき |k| > 1であるスーパーオシレーション領域では式(8)として表現できる。

$$|x| < x_{\rm s} = \arccos\sqrt{a} \tag{8}$$

またこの領域における振動の数は式(9)で表現できる。

$$n_{\rm osc} = \frac{N}{2\pi} \int_{-\arccos\sqrt{a}}^{\arccos\sqrt{a}} dx k(x) = \frac{N}{2\pi} \arctan\sqrt{a}$$
(9)



図 2.1 スーパーオシレーション関数が a>4のとき x=0 付近で周波数成分が高くなる様子

式(6)は|f|がスーパーオシレーション領域 (|k| > 1)では通常の領域 (|k| < 1)と比較して指数関数的に小さくなることを示している。したがって N は漸近的なパラメータであり、 スーパーオシレーション領域の振動数と、それに対応する |f|の指数関数的な小ささを表 している。

図 2.1 は式(2)に具体的な数値を用いて計算したグラフである。ここで青のラインは a = 10、N = 10の条件で、赤のラインは a = 1、N = 10の条件で計算した結果である。a = 1の条件(赤線)の場合は同じ幅のピーク(振幅の間隔が同じ)が並んでいることが分かる。しかし、a > 4の条件(青線)の場合、 $-0.5 < x/\pi < 0.5$ の範囲に確認できる複数のピークが $x/\pi = 0$ 付近に近づくにつれ幅が細く(振幅の間隔が短く)なっていることが分かる。

このようなスーパーオシレーション関数を電磁波で考えると、関数 f(x)は電磁波の伝搬 方向 z = 0 における平面でスリット間隔 d を持つ回折格子によって生成されると考えること ができ、z>0 に伝播していく電場は伝播する平面波のみから構成される。

$$\frac{aN}{d} > k > \frac{N}{d} \tag{10}$$

ここで*k*は波数であり、式(10)の条件を満たす場合エバネッセント波を含まない。このこと がエバネッセント波を利用しない Far-field での回折限界以下への集光につながっていく。 計算上回折格子の間隔 *d* は無限に小さくできるが、現実的には製作する上での加工精度に より制限され、有限の値を持つことになる。

ここでさらにシンプルな関数でスーパーオシレーションの具体例を示す。 $f(x) = A + B\cos(2\pi \times x) + C\cos(2\pi \times 2x) + D\cos(2\pi \times 3x) + E\cos(2\pi \times 4x) + F\cos(2\pi \times 5x)$ (11)



図 2.2 重ね合わせに使用した関数の周波数よりも高い周波数成分が発現している様子 青:f(x)、緑:f(x)、赤:f(x)を構成する波の中で最も高い周波数成分

式(11)のように 5 種類の周波数 (0, x, …, 5x) の波を足し合わせた数式を考える。このとき 定数 A = 1、B = 13295000、C = -30802818、D = -26581909、E = -10836909、F = 1762818 と し、この数式の計算結果を 図 2.2 に示す。青の実線は f(x)の計算結果を示し、赤の実線は f(x)に含まれる最も高い周波数成分である $\cos(2\pi \times 5x)$ のグラフを示している。f(x)に含まれ る最も高い周波数成分である赤の実線のピークよりも青の実線のピークのほうが細くなっ ていることから、f(x)は重ね合わせに使用した波の周波数成分よりも高い周波数成分を持つ ことが分かる。緑の破線は f(x)において x = 0 付近のピークの幅・高さと同じになるよう \cos 関数で最小二乗近似した関数 f(x)であり、計算の結果 $f(x)' = \cos(2\pi \times 27x)$ となる。この結果 から f(x)'の周波数成分は f(x)に含まれる最も高い周波数成分の 5.4 倍であり、f(x)が重ね合わ せに使用した波の周波数成分よりも 5.4 倍高い周波数成分を持つことを意味している。こ のように低い周波数成分の波を任意の係数をかけたうえで複数足し合わせることで、それ らに含まれている周波数より高い周波数成分を生じさせることができるのがスーパーオシ レーション現象である。

このようなスーパーオシレーションと呼ばれる現象を利用したレンズが SOL である。た だし図 2.2のグラフではセンター (x = 0)付近に高い周波数成分のピーク生成に成功して いるが、同時にセンターのサイドにも大きなピークが発生しており、このままではレンズ として利用する上で計測を阻害することになる。そこで次の章からはサイドのピーク強度 を抑えながらもセンターのピークの高い周波数成分を実現するためのレンズ設計方法につ いて述べていく。本研究では用途に合わせて形状の異なる3種類の THz 波帯向け SOL を開 発し、その集光性能を実証した。これらについて次章から詳細に述べていく。

参考文献

- [1] Y. Aharonov et al., Tel-Aviv, University Preprint, TAUP 1847–90, (2006).
- [2] Y. Aharonov *et al.*, Phys. Rev. A, **41**, 11-20 (1990).
- [3] Y. Aharonov et al., Phys. Rev. Lett. 64, 2965-2968 (1990).
- [4] Y. Aharonov et al., Phys. Rev. A, 48, 4084-4090 (1993).
- [5] M. Berry, J. Phys. A: Math. Gen., 27, 391-398 (1994).
- [6] M. Berry, Celebration of The 60th Birthday of Yakir Aharonov ed J S Anandan and J L Safko, 55-65 (1994).
- [7] S. Popescu, PhD Thesis Physics Department, Tel-Aviv University (1991).
- [8] A. Bucklew et al., J. Opt. Soc. Am. A, 2, 1233-1236 (1985).
- [9] A. Kempf et al., J. Phys. A: Math. Gen. 37, 12067-12076 (2004).
- [10] M. S. Calder et al., J. Math. Phys., 46, 012101 (2005).
- [11] M. R. Dennis et al., New. J. Phys., 14, 073013 (2012).
- [12] M. Berry et al., J. Opt. 21, 053002 (2019).
- [13] G.T. di Francia, Nuovo Cimento, Suppl. 9, 426-438 (1952).
- [14] E. T. F. Rogers et al., Nat. Mater., 11, 432-435 (2012).
- [15] M. Berry et al., J. Phys. A: Math. Gen., 39, 6965-6977 (2006).
- [16] F. M, Huang et al., Nano Lett., 8, 8, 2469-2472 (2008).
- [17] Y. Eliezer et al., ACS Photonics, 3, 1053-1059 (2016).

第3章 テラヘルツ波帯に向けたスーパーオシレーシ

ョンレンズの作製と評価

3.1 はじめに

第2章で記述したスーパーオシレーションという数学的性質は電波や音波のような波の 性質を持つ物理現象でも利用することが出来る。面内が部分的に電磁波を透過するマスク を使用し、空間上に複数の強度の空間周波数分布を生じさせることで、使用したマスクの 構造以下の小さなピークを生成する。このマスクには金属膜上に開口パターンを設けたも のや、Si 基板表面に凹凸を設け制御しているものが先行研究で報告されている。このよう なスーパーオシレーション現象を利用したレンズを「スーパーオシレーションレンズ (SOL)」と呼ぶ。

Zheludevら[1,2]は顕微鏡用途でUV、可視光(波長 640 nm)の電磁波を使って図 3.1(a) に示したスーパーオシレーション現象を利用したレンズを作製することで極小のスポット の生成を実現している。図 3.1(b)は(a)のレンズを通過後の強度分布を示しており、中央の 強度が高くなっていることが分かる。また(c)は(b)の中心付近を拡大した画像であり、φ185 nmのスポットが生成できていることを示している。またこのレンズを使用し、図 3.1(d)、 (f)で示した長方形の開口パターンをイメージングした結果から回折限界以下の分解能を達 成していることを図 3.1(e)、(g)で報告している。図 3.1(h)は図 3.1(f)の2本のスリットを従 来のレンズ(PET やテフロン製の球面レンズ)でイメージングした結果であり、図 3.1(g)で



図 3.1 可視光領域で製作された SOL[1]、(a)SOL 写真、(b)、(c)SOL で集光したスポ ットの計測結果、(d)、(f)スリットの SEM 画像、(e)、(g)SOL でスリットを計測し た結果、(h)従来レンズで計測した結果

示している SOL を使った評価結果と異なり、2本のスリットの区別ができていないことを 示している。SOL による極小スポットは従来の屈折を利用した球面のレンズと集光の原理 が異なるため、回折限界の制限を受けない。またエバネッセント波に依存した手法ではな く、任意の焦点距離において複数の空間周波数の電磁波の干渉を利用しているため近接場 に限定せず Far-field な領域で極小のスポットを生成することが出来るという特徴を持つ。

本研究では THz 波帯の波長が可視光や近赤外線に比べて長く、回折限界によって分解能 を高くすることができなかった課題に対し、これまであまり取り組まれてこなかったサブ THz 波帯におけるテラヘルツスーパーオシレーションレンズ(THz-SOL)の実現に取り組 んだ。同心円型の金属パターンを利用し、スーパーオシレーションによる回折限界以下の 集光を実現している。今回は 0.1 THz にて集光するようレンズの設計製作を行い、実験に て評価を実施している。

3.2 テラヘルツスーパーオシレーションレンズの設計手法

SOL は透過・非透過の領域の配置を最適化したパターンで構成されている。このパター ンはガラス基板上に蒸着した金属薄膜上に開口(スリット)を設けることで透過部を形成 している。一般的なラインアンドスペースの回折格子ではスリットと直行した方向に電磁 波が透過するのはよく知られている[3]。SOL も同様にレンズ半径方向に並んだパターンに 対して直交した方向の偏光成分が透過する。この透過した偏光成分がスーパーオシレーシ ョン効果を発現させ、透過する偏光と平行な方向に集光の効果が表れる。そのため任意の 1 点に集光するためには、円形のパターンに対して円偏光のビームを入射する必要がある。 図 3.2 は THz-SOL と、THz-SOL 通過後に観測面(Observation plane)で1点に集光する様 子を表した模式図である。x 軸, y 軸の方向はそれぞれレンズの半径方向であり、z 軸方向が 焦点距離の方向である。左の z = 0 mm の Aperture plane(xy 平面)に設置されているのが



Aperture plane

Observation plane

図 3.2 THz-SOL による集光の模式図



図 3.3 円形スリットの幅による干渉分布変化、(a)-(c)スリットの図、(d)-(f)スリット通過後の強度分布、(a)、(d)スリット幅:0.58 mm、(b)、(e)スリット幅:1.17 mm、(c)、(f) スリット幅:1.76 mm



図 3.4 円形スリットの半径による干渉分布変化、(a)-(c)スリットの図、(d)-(f)スリット通 過後の強度分布、(a)半径:1 mm、(b)半径:12.3 mm、(c)半径:21.7 mm

THz-SOL の模式図であり、黄色部分が金属、灰色部分がガラス基板部分を示している。図 の左側から THz 波が入射され、この複数の同心円型の金属スリットを通過した THz 波は z 方向に進みながら干渉し強め合う。金属スリットの幅、配置、をうまく設計することで、 任意の焦点距離で強く干渉させ、回折限界以下のスポットを生成させることができる。こ の集光する点(焦点)が図 3.2 の右側の Observation plane の原点である。このときθは Aperture plane における THz-SOL のスリット部の任意の点と Observation plane の原点(集光 位置)、z軸でなす角度を示している。Observation plane の任意の点 P(x, y, z)の強度は THz-SOL のスリット部における各点から到達する電場の総和として表現することができる。 次にマスクに同心円型のスリットを 1 本設けたときの電磁波の挙動について記述する。図 3.3 は 1 本の同心円状のスリットを THz 波が通過した後の強度分布を示している。図 3.3(a, b, c)はスリットの幅が異なる同心円型の3種のマスクを示しており(半径 12.3 mm、(a)ス リット幅: 0.58 mm、(b)スリット幅: 1.17 mm、(c)スリット幅: 1.76 mm)、白い部分が電 磁波の透過部、黒い部分が電磁波の日透過部分である。それぞれのスリットを THz 波が通 過した後の強度分布を図 3.3(d, e, f)に示す。図 3.3(d, e, f)から、スリットの幅が狭いほど回 折が強くなるため、THz 波が集光する位置がスリットの位置(z = 0)に近くなり、かつ集 光したスポットの強度が弱くなっていることも分かる。

またスリットの半径もスリット通過後の強度分布に影響する。図 3.4 はスリットの幅は 1.17 mm、半径だけが異なる3種のスリットを通過後の電磁波の強度分布を比較している。 半径が小さいほど、焦点距離が短くなっていることが分かる。このようにスリットの幅、 半径がスリット通過後の電磁波の集光に大きく影響することが分かる。さらにスリットを 複数設け、それぞれの幅、半径を最適に設計することで回折限界以下のスポットが生成可 能なパターンを求めることができる。

ここから THz-SOL のレンズ設計の流れについて述べていく。図 3.5 は設計フローを示し たものである。図 3.5 左上のように最初にレンズの径を決め、その範囲内を同心円状の単 位領域に区切っていく。この単位領域は波長より小さな幅を持つ同心円状の領域である。 区切った各単位領域の透過・非透過をランダムに定め、仮のレンズパターンを作製する。 次に図 3.5 下中央のように仮のレンズパターンを作製した後、このパターンを使った場合 の任意の焦点距離における強度分布を計算する。*x*,*y*,*z* 軸方向の強度分布 *E_x*,*E_y*,*E_z*は以下の 式の通り極座標で表現した角スペクトル法を用いて計算できる[4-8]。

$$E_{x}(r, z) = \int_{0}^{\infty} A_{0}(l) \exp[j2\pi q(l)z] J_{0}(2\pi lr) 2\pi ldl$$

$$E_{y}(r, z) = 0$$
(12)
$$E_{z}(r, \varphi, z) = -j\cos\varphi \int_{0}^{\infty} \frac{1}{q(l)} A_{0}(l) \exp[j2\pi q(l)z] J_{1}(2\pi lr) 2\pi ldl$$
with $A_{0}(l) = \int_{0}^{\infty} t(r) g(r) J_{0}(2\pi lr) 2\pi rdr$

rはレンズ半径方向の位置、q(l)はレンズパターンによって生じるレンズ径方向の空間周 波数成分、 $A_0(l)$ はレンズ内の電場の角スペクトル である。 J_m はm次のベッセル関数、t(r)はレンズの透過率関数、 $g(r) = \exp(-r^2/w_0^2)$ 、 w_0 はガウシアンビームを用いた場合のビーム ウェストでの半径である。さらにこの数式を用いて SOL へ円偏光のビームを入射したとき の任意の焦点距離zでの電場強度は以下のように表現できる。

$$I(r, \varphi, z) = 2 \left(|E_x(r, z)|^2 + |E_z(r, \varphi, z)|^2 \right)$$
(13)



図 3.5 THz-SOLパターンの設計フロー

図 3.5 右下のグラフは上記の計算で得た焦点距離における強度分布を示しており、図の ように焦点平面の中心に発生するピークの幅(本研究では半値全幅(FWHM)で評価し た)、ピークの強度、サイドローブの大きさを計算する。SOL は従来と異なる集光原理に より極小のピークを生成できるが、メインピークと同時にその周囲にも別のピーク(サイ ドローブ)が発生してしまうことが避けられない。もしサイドローブがメインピークと近 く、また強度もメインと比較して大きなピークになった場合、計測分解能を低下させてし まう。そのため計測分解能向上のためにメインピークを細く、強くするとともに、サイド ローブの大きさを小さく抑えたデザインを設計する必要があった。

以下3つの条件を評価関数とし、仮のレンズパターンの最適化を実施する。

・メインピークの幅の最小化

・メインピーク強度の最大化

・サイドローブ比(メインピーク強度に対するサイドローブ強度の割合)の最小化 本研究では最適化に対し後述する Binary Particle Swarm Optimization (BPSO)を利用してい る。そして最適化の結果、最終的に所望の SOL パターンを得ることが出来る。この設計フ ローを図にしたものが図 3.5 である。本研究では上記3条件に加え、図 3.5 右上のように サイドローブ比が 30%以下であることを条件に加え、最適化計算を行った。

ここでこのフローと第2章の式(2)、(3)との関係について述べる。式(2)、(3)は cos 関数の 周波数を変えたものを足し合わせていくことで、足し合わせに使用した cos 関数が持つフ ーリエ成分以上に高い周波数成分を生じさせていた。これに対しレンズの設計フローの中 でレンズ面内を単位領域で区切っているが、この単位領域をどんどん細かくしていくこと で、デザインできるバリエーションが増えデザインが持つ周波数成分が高くなっていく。 これが式(3)中の n が大きくなり高いフーリエ成分が増えることが同義となっている。一見 つながりがなさそうに見えるが、このようにレンズの設計フローは確かにスーパーオシレ ーションの原理に基づいたものになっている。

3.3 Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) について

3.2 で触れた最適化の手法について述べる。まず Particle Swarm Optimization (PSO)について述べると、PSO は魚や昆虫のような群れで行動する生物の動きを模倣したアルゴリズムになっており、広い解析空間から効率的に局初解に到達できることが特徴である。図 3.6 はこのアルゴリズムのイメージ図である。解析空間の中で比較的近い場所に複数の粒子 x_t

(群れ)があり、図 3.6 中では蜂の絵で表現している。この群れが複数解析空間の中に存在する。各群れの中で最も評価関数の条件を満たすものをパーソナルベスト p_{best} と呼び、さらに全粒子の中で最も評価関数の条件を満たすものをグローバルベスト g_{best} と呼ぶ。次に解析を行う粒子 x_{t+1} は 1 個前の粒子 x_{t-1} と現在の粒子 x_t の差、それから p_{best} と x_{t-1} の差。

 $x_{t+1} = x_t + v_{t+1}$

with
$$v_{t+1} = c_0(x_t - x_{t-1}) + c_1 rand (p_{best} - x_t) + c_2 rand (g_{best} - x_t)$$
 (14)

vは位置を更新するための速度ベクトル、 c_0 、 c_1 、 c_2 は重み計数であり、PSOでは $c_1 \ge c_2$ は同じ値で 1.5が推奨値、 c_0 は繰り返し試行毎に小さくなるようにするのが好ましいとされており 0.9 から 0.4 まで変化することが推奨されている[9]。 $c_1 \ge c_2$ には乱数をかけることでランダム性を持たせ、より効率的に解に収束するよう工夫されている。

ただし、なかには PSO では表現できないような問題も世の中には存在する。例えばスイ ッチの ON/OFF のような 2 値でしか表現できないような問題である。この場合には PSO を



図 3.6 BPSO イメージ図

2 値に拡張した、Binary Particle Swarm Optimization (BPSO)を用いることで解決する。この場合、粒子の更新のための速度ベクトル v が 0 と 1 の 2 値でしか表現できないので、以下のように表現する。

$$S(v_{mn,t}) = \frac{1}{1 + \exp(-v_{mn,t})}$$

if $(rand < S(v_{mn,t}))$, then $x_{mn,t} = 1$ else $x_{mn,t} = 0$ (15)

S(*v_{mn,t}*)はシグモイド関数の形になっており、閾値 *rand* と比較したときの大小で0か1のどちらの値になるか決まる。先行研究では閾値は 0.6 を推奨している[4]。これにより2値でしか表現できない問題も対応できるようになった。SOLのパターンも透過率 が0か1の2値で表現できるため本研究ではこの BPSOを用いてパターンの最適化を実施した。

3.4 テラヘルツスーパーオシレーションレンズの設計と製作につ

いて

本研究では 0.1 THz 向けにレンズ径 100 mm、焦点距離 75 mm、単位スリットを 0.5 mm、 入射波は円偏光の平面波として THz-SOL を設計した。図 3.7(a)はレンズ断面の模式図を示 している。こちら同心円状パターンの中央の断面であり、ガラス基板の上に幅と間隔が最



図 3.7 (a) THz-SOL 断面模式図、(b) THz-SOL 半径方向への透過率

表 3.1	レンズの設計パラン	メータ
-------	-----------	-----

Diameter (mm)	Focal length (mm)	Transmittance function (decimal number)
100	75	8C219 49824 86280 15200 3005c



図 3.8 電磁波の周波数と金の表皮深さの関係

適化された金属(金)の薄膜が設けられた形状をしていることを示している。薄膜の厚み が t、レンズ半径が R、金属薄膜の最小の幅は λ/6 である。またこのレンズは同心円形状 をしているため左右対称の形状になっており、図 3.7(a)は直径上の断面を示しており、

図 3.7(b)は本研究で設計した THz-SOL のレンズ外周部から中心に向けた透過率の分布を 示している。THz 波はガラス基板部を透過するため透過率が 1、金属パターンによって THz 波が遮断されている部分は透過率が 0 になっている。この中心からレンズ外周部から 中心に向けた透過率の分布を 3.3 の設計フローにのっとり設計する。ちなみにレンズ通過 後の強度はレンズ面積中の開口部分に依存するため、開口部分の総面積は大きいほうが望 ましい。表 3-1 は本研究で設計したレンズの条件(レンズ直径 100 mm、 焦点距離 75 mm) と、レンズ中央から半径方向に向かった 0 と 1 で表現された透過率分布(Transmittance function)を示している。Transmittance function はレンズ外周部から中心に向けた各単位領 域の透過率を表現した 2 値の行列であり、本研究では半径方向に 100 の単位領域に分けて 計算を行った。ここでは0と1の200個の数列を簡易に表記するため12進数で記している。

THz-SOL のパターンは金属の薄膜を使って制作している。ガラス基板(厚み 400 μm) 上にバッファ層としてクロム 10 nm の層、その上に THz 波の透過・非透過領域形成のため の金の薄膜 300 nm を蒸着、パターンはフォトリソグラフィによって作製した。この時、金 の薄膜の厚みは THz 波を完全に遮断するため表皮深さ(skin depth)以上となるように設計 する必要がある。表皮深さとはある材質に入射した電磁界が 1/e に減衰する距離のことで あり、表皮深さるは以下の式で計算される。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_{,} \mu_{0} \sigma}} \tag{16}$$

f は周波数 (0.1 THz)、 μ_r は比透磁率 ($\mu_r = 1$)、 μ 0 は真空中の透磁率 (1.257 × 10⁻⁶ [N/A²])、 σ は金の伝導率 (46 × 106 [S/m])である。式(16)より 0.1 THz における金の表皮深 さは 235 nm であり、今回のレンズでは厚みに十分に余裕を持たせるため金の厚み 300 nm を設計値とした。図 3.8 は式(16)から求めた電磁波の各周波数と金の表皮深さの関係を示し



図 3.9 製作した THz-SOL の写真

ている。こちらのグラフから周波数が低いほど表皮深さは大きくなり、特に 0.1 THz を下回ると表皮深さが大幅に大きくなることが分かる。

最後に図 3.9 に 4 インチのガラス基板上に金とクロムを蒸着して製作した我々の THz-SOL の写真を示す。写真は金属薄膜側から撮影しており、表面が金色になっていることが 確認できる。設計の結果、スリットの数は中心に近い領域に多く、外側に向かうほど間隔 が疎になっている傾向があることが分かる。

3.5 テラヘルツスーパーオシレーションレンズの評価系

図 3.10 に製作した THz-SOL の性能を評価するために構築した実験系の模式図を示す。 計測には Keysight 社製 N5247A ネットワークアナライザに逓倍機 N5256X10 を接続して使



図 3.10 実験系模式図

用した。こちらの計測器の計測範囲は 0.067 ~0.11 THz である。発振器側には直線偏光か ら円偏光に変換するための 1/4 波長板と円形ホーンアンテナ、受信側には円偏光から直線 偏光に変換するための 1/4 波長板と φ2.1 mm のプローブアンテナを接続している。プロー ブアンテナ側には迷光防止のための吸収材も設置している。SOL には平行光を入射する必 要があるため、ホーンアンテナから出たビーム径の拡大、コリメートのため直径 150 mm、 焦点距離 100 mm のテフロンレンズを 2 枚設置している。上記テフロンレンズでビーム成型 した後 SOL によって生成されたスポットの強度分布は、受信側の逓倍機を *xyz* 3 軸の電動 ステージで移動させ計測を実施した。また製作したレンズを使ってイメージングによる分 解能の評価も実施しており、その際には受信機は固定、スポットの生成位置に分解能評価 用サンプルを設置し、この分解能評価用サンプルを電動ステージで移動させることでイメ



図 3.11 焦点の xz 平面における強度分布の (a)実験結果と(b)計算結果



図 3. 12 *xy* 平面から見た焦点の (a)強度分布(実験結果)と(b) *x* = 0, *y* = 0 上の強度分布(実験結果)



図 3.13 z 方向のスポット径分布、オレンジのプロット:スポット径(実験結果)、赤の実線:スポット径(分解能 0.1 × 0.1mm での計算結果)、赤の破線:スポット径(実験系と計 測分解能と合わせた計算結果)、青の実線:サイドローブ比、黒の実線:回折限界

3.6 スーパーオシレーションレンズの評価結果と考察

図 3. 11 から図 3. 13 に製作した THz-SOL によって生じるスポットの評価結果を示す。図 3. 11(a)は計測した xz 平面内のスポットの強度分布を示しており、75 mm から 110 mm 付近 にかけて集光しており、強度としては 85 mm で最大となっていることが分かる。図 3. 11(b) は式(12)による THz-SOL 透過後の強度分布について数値解析ソフトウェア Matlab を使って 計算した結果を示している。解析空間はレンズ直径の 4 倍である 400 × 400 × 120 mm で計 算を行った。(a)の計測結果と同様の z の位置に集光していることが分かる。計算上、レン ズ面積に対する THz 波透過部の開口率は 28%であり、z = 85 mm におけるスポットの集光 効率は入射したビーム強度の 15.7%となっており、開口部を通過した THz 波のうち 10%程 度ロスをしていることになる。図 3. 11 は集光されたスポットのみに注目し表示しているが、 SOL の特徴であるサイドローブが x < -4、x > 4において発生している。このサイドローブ と中心に生成されたスポットの強度の関係(サイドローブ比)については後述の図 3. 13 の 説明にて述べる。また図 3. 11 の(a)実験結果と(b)計算結果における違いの要因についても 後述の図 3. 13 にて合わせて述べる。

また図 3.12(a)は図 3.11(a)において集光が始まる地点 z = 75 mm における xy 平面の強度分 布計測結果であり、 (b)は x = 0上、y = 0上の強度分布を示している。青い線が x = 0上の強 度分布、赤い線が y = 0上の強度分布である。青・赤線共にほぼ重なっており、青い線の半 値全幅が 4.0 mm(1.3λ)、赤い線の半値全幅が 4.0 mm(1.3λ)であることから、スポット がきれいな円形に集光されていることが分かる。さらに図 3. 11 の結果から z 方向に針のよ うに細長いスポット形状であることが分かる。

図 3.13 は本レンズで生成したスポット(図 3.11)の z 方向へのスポット径の変化(左縦 軸)とサイドローブ比の変化(右縦軸)を示したグラフである。まずスポット径について 述べる。オレンジのプロットが実験結果、赤の実線が計算結果である。赤の破線は計算す る際の空間分解能を補正した結果である。また黒の実線は回折限界の理論式より求めたス ポット径を示している。オレンジのプロットと赤の実線のグラフを比較すると z=75 mm に おける実験結果のスポット径が計算結果の2倍になっており差があることが分かる。ここ で実験結果と計算結果の違いの要因について述べる。受信側プローブアンテナの開口は φ2.1 mm と計算の分解能よりも大きいことによるものであると考えている。プローブアン テナは導波管の規格(EIA 規格)WR10を使用しており、これより小さくすると開口内に THz 波が伝搬しないため現実的に実測できる分解能の下限がこの大きさであった。そこで 計算上で空間分解能をアンテナ開口と同じにして計算、プロットしたのが赤の破線である。 この赤の破線とオレンジのプロット(実験結果)はよく一致していることが確認できる。 黒の実線は回折限界理論によって計算したスポット径であり、赤の破線上のスポット径は 0.6んと回折限界の 0.55倍であることが分かる。

次にサイドローブ比について述べる。前述したように本レンズにおいても SOL の特徴で あるサイドローブが発生している。図 3.13 の右の縦軸がサイドローブ比を表しており、ス ポットが集光されている z = 75 mm から 100 mm 付近の範囲で 30%を切っている。これは BPSO を用いて最適化する際に、焦点位置におけるサイドローブ比が 30%以下になるよう に条件を加えていたからであり、この条件がない場合は非常に小さなスポットが生成でき るが強度が大きなサイドローブも生じてしまう設計結果にもなりうる。サイドローブ比は できるだけ小さい方が好ましいが条件が厳しすぎると最適化計算が収束しないため今回は 30%以下を条件とした。

また z 方向に針状に集光しているということは長い DOF を持つことを意味している。 DOFをここではスポット中央のサイズから√2倍になるまでの距離と定義すると、DOFは47 mmとなり、これは従来レンズの 10.8 倍になる。このように THz-SOL は目標としていた、 「回折限界以下のスポット」、「Far-field な焦点距離」、「長い DOF」の全てを満たして

いることが分かる。

25



図 3.14 分解能評価用サンプルの写真

mm、高さ 5 mm の開口部部分を横切 るように走査した結果を図 3.15 に示 す。図 3.15の各グラフは(a) 0.9 mm、 (b) 1.1 mm_{\circ} (c) 1.3 mm_{\circ} (d) 1.5 mm_{\circ} 幅のスリットを走査した結果であ る。青線はスリット走査結果、赤線 はスリットの幅を表現している。(a) は x = 2~4 mm の間で強度が上がって いるが、4~6 mm、6~8 mm に本来開口 部があるはずなのに強度が低く、ス リット形状を表現できていない。 (b) はスリット部分で強度が上がってい るが、x=7mm付近の強度が上がって おらず、正確な形状を表現できてい るとは言えない。(c)もスリット部分 の強度が上がってはいるが、スリッ トとスリットの間でもピークが発生 しており、正確な表現は出来ていな い。(a)-(c)と比較すると(d)はスリット 部分で強度が上がり、また複数のス リット部分で同程度の強度になって いることが確認できている。これら の結果から THz-SOL を使ったイメー ジングの性能としては 1.5 mm だと判 断した。(b)-(d)ではスリットとスリッ

さらにこの THz-SOL の性能を評価するため評価 用サンプルを用意し、イメージングを行った。この とき使用した分解能評価用サンプルの写真が図3.14 である。こちらも製作した THz-SOL 同様にガラス 基板上に金とクロムを蒸着し、フォトリソグラフィ 工程にて作製した。このサンプル上には複数の幅の スリット、アルファベットのパターンが設けられて おり、このうち幅 0.9 mm、1.1 mm、1.3 mm、1.5



図 3.15 分解能評価サンプルのスリット部走査結 果、(a)幅 0.9 mm、(b)幅 1.1 mm、(c)幅 1.3 mm、 (d)幅 1.5 mm

トの間であり本来スリットがない部分に小さな ピークが発生していることもこられのグラフか ら分かる。実験時には分解能評価サンプルとプ ローブアンテナ先端の間には 2 mm の距離がある ため、これらピークは隣り合うスリットを通過 した THz 波が干渉しあうことで発生したものと 考えられる。

これを検証するため角スペクトル法にてスリ ット2つの干渉パターンを計算した。図 3.16 は 今回計測したものと同じサイズ(高さ 5 mm、幅 1.5 mm)のスリット2個に THz 波を入射した場合 の計算結果である。(a)はスリットの形状、(b)は この2つのスリットを通過した後、スリットか ら2mm離れた距離での強度分布である。(c)は(b) における y = 0 mm 上の強度をプロットしたもの である。図 3.15(b)のグラフにおける x = 6 mm 付 近、図 3.15(c)のグラフにおける x = 3 mm 付近に 信号があるように干渉によってスリット間に小 さなピークが発生していることが確認できてい る。図 3.17 は図 3.15(d)と同じ幅 1.5 mm のスリ ットを2次元に走査したイメージング結果であ る。図 3.15(d)で確認できていたスリット開口部 同士の間に干渉による弱い強度のピークがある ことがこちらのスキャン結果からも確認するこ とができる。また図 3.18(a)、(b)は線幅 1.5 mmの アルファベット (ASAHI、DMRC) をイメージ ングした結果である。隣り合う文字の間隔も 1.5 mm 間隔になっており、図 3.18(a)の"H"と"I"の 間、図 3.18(b)の"M"と"R"の間には図 3.15(d)、 図 3.17 で述べた干渉のピークが同様に確認でき るとともに、文字開口部の強度に対してこの干 渉部の強度が半分以下になっていることからど



図 3.16 スリットによる干渉の計算結果、 (a)検証に使用したスリット形状、(b)サン プルから 2 mm 離れた位置での強度分布、 (c)y=0における強度分布

ちらも隣り合う文字の形状が区別できていると判断した。ただし"M"の先端部のように 徐々に2本の線幅が小さくなり、1.5 mm より幅が小さくなる部分については形状が崩れて しまう様子も確認できている。



図 3.17 スリット(幅 1.5 mm)イメージング結果



図 3.18 アルファベットパターンのイメ ージング結果 (a)ASAHI、(b)DMRC

3.7 まとめ

これまで顕微鏡用途の可視光、UV 向けとして報告例のある SOL に注目し、同心円型の 金属パターンで構成されたレンズを THz 向けに設計、製作、評価を実施した。今回は 0.1 THz (λ = 3 mm) 向けに直径 100 mm、焦点距離 75 mm、単位領域幅 1/6 λ (0.5 mm) として 設計を実施し、結果 z = 75 mm から 110 mm の範囲で針状のスポットを生成することができ ることを実験で確認できた。計算結果との比較も実施し、計測分解能と計算上の分解能を 合わせることで両者が一致していることも確認できた。計算結果からスポットは

z = 75 mmにおいて 0.6 λ と回折限界の 0.55 倍の大きさであり、DOF は 47 mm(従来レンズの 10.8 倍)になる。また製作したレンズの性能を評価するため評価用サンプルを用意し イメージングを実施した結果 1.5 mmの計測分解能があることを確認できた。以上より THz-SOL は目標である 3 つの要素(回折限界以下のスポット、Far-fieldの焦点距離、長い DOF) をすべて満たすことのできる技術であることを確認できた。

参考文献

- [1] E. T. F. Rogers *et al.*, Nat. Mater. **11**, 5, 432-435 (2012).
- [2] T. Young, Phil. Trans. R. Soc., 92, 12-48 (1802).
- [3] G. Yuan *et al.*, Sci. Rep., 4, 6333 (2014).
- [4] H. F. Talbot, Philosophical Magazine, **3**, 9(56), 401-407 (1836).
- [5] M. Li et al., Sci Rep, 7, 1335, (2017).

- [6] T. Liu et al., J. Opt. 17, 035610 (2015).
- [7] T. Liu *et al.*, Opt. Express, **21**, 13, 15090-15101 (2013).
- [8] T. Liu *et al.*, Opt. Express, **23**, 25, 32139-32148 (2015).
- [9] N. Jin et al., IEEE Trans. Antennas Propag., 55, 556-567 (2007).

第4章 1軸方向に集光するテラヘルツスーパーオシ

レーションレンズの作製と評価

4.1 はじめに

第3章では同心円型のTHz-SOLについて設計製作・評価を行ってきた。THz-SOLはTHz 波帯で回折限界を超える領域への集光、Far-fieldの焦点距離、長いDOFの3つの条件を満 たすことができる技術であり、パターンによって異なる特徴を生み出すことができる。本 章ではさらに具体的な用途を想定し、THz-SOLの実用性について述べる。例えば工業用途 ではフィルムのような製品の場合、図4.1のように広い範囲を1度に計測する必要がある。 図4.1は1軸方向にのみ集光可能なTHz-SOLを生産プロセスに適用した際のイメージを示 した模式図であり、従来のシリンドリカルレンズの働きを模したこのTHz-SOLを本稿では テラヘルツシリンドリカルスーパーオシレーションレンズ(THz - Cylindrical SOL(THz-CSOL))と呼んでいる。また図4.1はフィルム状の製品がロールで搬送されている様子を 示しており、製品とともに異物・ゴミが搬送されてくる様子を示している。可視光を利用 した検査機では、全面の検査をするために照明を流れ方向にのみ集光し、検査分解能を上 げる工夫が一般的に良く行われる。そこで集光の方向を1軸方向に限定して集光するTHz-SOL を実現することで、THz 波帯でTHz-SOLの適用範囲をより広げることに取り組んだ [1]。



図 4.1 THz-CSOL の使用イメージ

4.2 テラヘルツシリンドリカルスーパーオシレーションレンズの

設計

第3章で述べた同心円型のレンズでは円偏光した THz 波のビームを入射することにより、 中心の1点に極小のスポットが生成されるようにレンズパターンを最適化している。同心 円型 THz-SOL の集光効果は偏光の向きとパターンが周期的に並んでいる方向が平行なとき に発現する。これはラインアンドスペースの回折格子においてもスリットと直行した方向 に電磁波が透過するのはよく知られている[2]が、スリットの幅、間隔を最適化することで スーパーオシレーション効果を発現させ集光の効果させることができる。

ここからテラヘルツシリンドリカルスーパーオシレーションレンズの設計フローについ て述べる。まず同心円の THz-SOL と同様、最初にレンズの外形を決め、その中を単位領域 に区切っていく。本研究ではレンズの大きさを 100 × 100 mm、単位領域の幅を 250 µm (λ /12) とした。図4.2 はこの工程の模式図であり、中央が単位領域に区切る工程を示して いる。単位領域への分割が終わったのち、図 4.2 の右図のように区切られた各単位領域の 透過率 (0か1)を決めて仮のレンズパターンを作製する。次にこのパターンを THz 波が通 過した後の強度分布を計算する。第 3 章で同心円型のパターンを通過した後の電場の計算 式として式(12)を述べたが、その式を直線偏光で表現できるよう変形したものが以下の式 である。

$$E_{x}(x, z) = \int_{0}^{\infty} A(l) \exp[j2\pi q(l)z] J_{0}(2\pi lx) 2\pi l dl$$

$$E_{z}(x, z) = -j \int_{0}^{\infty} \frac{1}{q(l)} A(l) \exp[j2\pi q(l)z] J_{1}(2\pi lx) 2\pi l dl$$
(17)

with
$$A(l) = \int_0^\infty t(x) g(x) J_0(2\pi lx) 2\pi x dx$$



図 4.2 THz-CSOL 設計フローにおける単位領域分割の様子

各変数の意味は式(12)と同様である。また強度は以下のように表現できる。

$$I(x, z) = (|E_x(x, z)|^2 + |E_z(x, z)|^2)$$
(18)

式(17)、(18)を用いてレンズ通過後の電場強度分布を 400×400 mm の空間分計算し、その 時のスポット径、サイドローブ比、ピークの強度を評価関数としてレンズのデザインを最 適化する。本研究では焦点距離 z = 70 mm、 入射するビームは直線偏光の平面波として設



図 4.3 BPSO による THz-CSOL のパターン最適化フローチャート

計しており、最適化の条件としてはスポットの径が回折限界以下となるように 0.9ん以下、 サイドローブ比が 40 %以下、の条件を満たすように設計を行っている。

また今回は DOF の長い集光を実現するため焦点位置だけではなく、焦点距離 ±2 mm の 範囲の強度分布も計算し、全ての距離範囲でスポット径が小さくなるようにレンズデザイ ンを BPSO で最適化した。

図 4.3 はこの最適化の流れを示したフローチャートである。まず BPSO で計算するにあ たってパラメータを設定する。本研究では1つの群れの中に含まれる粒子数 m = 200、群れ の数 n = 100、各重み係数を w = 0.5、C₁ = C₂ = 1 とし、繰り返し試行回数 T = 1000 の条件で 計算を実施した。次に初回はランダムで決まったレンズデザインを元に任意の焦点位置で の電場分布を計算、各群れ毎に最も最適化条件に近いもの(スポットの径が 0.9λ以下、サ イドローブ比が 40%以下)を算出しパーソナルベスト pbest とする。さらに各群れ毎にパー ソナルベストを求め、その中でも最も条件に近いものをグローバルベスト gbest に決める。 そのあとはこの gbest と pbest を使ってレンズデザインを更新するためのベクトルッを算出し、 v と式(15)で求めた値が閾値を超えていた場合、単位領域に設定した透過率を更新する。更 新したレンズデザインで最適化条件を満たすかを再度計算し、条件を満たすまで上記計算 を繰り返すことで最終的にレンズデザインが最適化される。

ちなみに本研究で最適化の結果、最終的に求められた各単位領域の透過・不透過の分布 を第3章同様に12進数で表現したものが表4.1である。また図4.4は本研究で設計したレ ンズデザインである。白い部分がTHz波透過部分、黒い部分が不透過の部分である。この



表 4.1 設計したレンズの透過率分布(0 or 1)を 12 進数で示したもの

図 4.4 設計した THz-CSOL のパターン(白い領域:透過部、黒い部分:非透過部)

レンズも中央付近にスリットが多く、比較すると外周部のほうがスリットの間隔が疎にな る傾向が確認できる。

4.3 テラヘルツシリンドリカルスーパーオシレーションレンズの

集光性能

設計した THz-CSOL パターンによるレ ンズ通過後の強度分布を式(17)と数値解 析ソフトウェア Matlab を使って計算し た結果が図 4.5 である。図 4.5(a)は xz 平 面の強度分布を示しており、またこの グラフは面内の最大強度で規格化して 示している。このグラフを見るとz = 70 mm 近辺に1点だけスポットが集光され ている様子が確認できる。z=71.2 mmで スポットの強度が最大になっており、 67.7 mm から 76.6 mm の間で集光してい る。図 4.5(b)はz = 71.2 mm における xy 平面の強度分布を示している。x = 0 mm に沿って1直線状に集光し、強度が強く なっていることがわかる。x = 6 mm、-6.1 mm にも少し明るいラインがはいっ ているが、これはサイドローブが発生 していることを意味している。図 4.5(c) は (b)における y = 0 mm 上の x 軸方向の 強度分布を表しており、中央に鋭いピ ーク、その周辺に弱いピークが確認で きる。このセンターのピークの幅が 0.83λ であり、最適化条件であった 0.9λ 以下という条件を満たしていることが わかる。またサイドローブ比も 30%と なっており、こちらも最適化条件 40 % 以下を満たしている。



このレンズで集光したラインの強度 図4.5 計算結果、(a)SOL 通過後のxz 半面强度分 の入射した THz ビームの総パワーに対 布、(b)SOL 通過後 (z=70 mm)の xy 平面強度 する比率は 25.5%であり、従来のレンズ 分布、(c)z=70 mm、y=0 mm 上の強度分布

と比較して極小の集光が可能な反面、透過率という観点ではデメリットもある。これは SOL では透過率は開口面積に大きく影響されるためである。集光ビームラインのパワーを 向上させることは、CSOLの設計における今後の課題の1つであると考えており、解決策と してパターンを透過、不透過部分と完全に分けるのではなく、パターン厚みを制御し透過 率が異なるパターンを複数用意して最適化することでレンズ全体として透過してくる THz 波の強度を上げる方法や、強度に着目して最適化するのではなく、パターンによって透過 してくる THz 波の位相遅れが異なる領域を作って本提案レンズと同等の効果を実現する案 を考えている。

図 4.6(a)は、集光ビームラインの幅とサイドローブ比の分布をz方向に沿って示したもの である。赤の点は入射波の波長($\lambda = 3 \text{ mm}$)で規格化したビーム幅を示し、シアンの点は サイドローブ比の値を示す。黒の実線は回折限界を示している。このグラフからも分かる とおり集光ビームラインの最小幅はz = 71.2 mm で 0.83 λ (2.5 mm)となり、サイドローブ 比も 32.9%と最適化規準を満たしている。0.83 λ のビーム幅は回折限界より約 21%小さく、 さらに、z = 67.7 mm から 76.6 mm まで、レンズの解像度は回折限界よりも小さな分解能を 維持している。さらに焦点距離 70 mm で大きさが 100 × 100 mm の THz-SOL の実効的な *NA* を計算すると 1.43 となり、従来のレンズでは空気中で実現できない 1 以上の数値を達成し ていることがわかる。また、この計算結果から本レンズの DOF が 10 mm(3.3 λ)と求めら



図 4.6 計算結果、(a)z 軸方向に対するスポット径の変化、赤の点はスポット径、シアン の点は再度ローブ比、黒の実線は回折限界、(b)x=0 mm、y=0 mm 上の z 軸方向への強 度分布



図 4.7 入射するビームの強度分布の影響比較、(a)-(c)入射するビームの強度分布、(d)-(f) z = 70 mm 地点における x 軸方向の強度分布

れる。同じ径、焦点距離の従来レンズでは DOF は 8.8 mm となるため、THz 波向けレンズ として重要である DOF も従来レンズの性能を上回っているといえる。 ここで、DOF は λ/(2NA²)として計算した[3]。従来レンズの場合、DOF が長くなると NA が 小さくなってしまうが、これまでの結果から SOL ではこれが当てはまらない、ユニークな 特徴を持つといえる。図 4. 6(b)は、z 方向に沿った強度プロファイルを示している。強度は z = 71.2 mm で最大となり、集光したビーム幅が回折限界より小さい範囲、つまり z = 67.7 mm から 76.6 mm までの範囲では、ピーク強度の 68.4%を維持していることがわかる。レン ズ設計時には平面波を想定して計算を実施したが、入射ビームの強度分布が集光に影響す ることは予想できたため、その集光性能に与える影響についても検討している。

図 4. 7 (a)-(c)は、1 次ベッセル関数 J₀(s)を用いて計算した入射ビームプロファイルであり、 図 4.7 (a)、(d)のプロットでは s = y/2、図 4.7(b)、(e)では s = y/2.5、図 4.7(c)、(f)では s =y/3として計算した。図 4.7(a)は $x = \pm 50$ mm において強度がほぼ0になっているのに対し、 図 4. 7(b)では x = ±50 mm において強度が約 0.2、(c)では x = ±50 mm において強度が約 0.4 になっており、(a)-(c)の順にビーム中央からの変化が緩やかになっている。焦点距離(z= 70 mm)における強度パターンを図 4. 7(d)-(f)に示すが、これらのグラフを比較すると入射 ビームプロファイルが中央からの強度変化が緩やかなほど、集光されたビーム幅とサイド ローブ比が小さくなることがわかる。これはレンズの外側の強度が弱くなることで、実質 的な NA が小さくなっていると考えられる。ここまで入射するビームの強度分布について 比較してきたが、そのビームを発振する THz 波源として代表的なものに IMPATT ダイオー ド、ガンダイオード、共振トンネルダイオード等がある[4-6]。これらの THz 波源の放射す るビームには強度分布とともに放射する周波数にも多少の広がりを持つ。THz-SOL のパタ ーン寸法は入射する波長によって決まるため、複数波長が同じパターンに入射された場合、 波長毎に集光位置・スポットサイズが決まり、結果として各波長の集光結果を重ね合わせ た形の強度分布となる。そのため、ここまでは理想的に単一の周波数を想定し計算してき たが、実際の機器を想定して THz-CSOL の性能の周波数依存性についても評価した。市販 されている CW の THz 光源(ex. TeraSense 社、IMPATT-Diode)の周波数帯域幅は数十 kHz であり、その範囲を含むよう広く周波数を変化させ集光性能の変化、サイドローブ比の変 化を計算した。

0.1 THz向けに設計した THz-CSOL に対して、入射する周波数を変化させたときの集光ビ ームの幅を比較した結果を図 4.8(a)に示した。青のプロットが 0.098 THz を入射した場合、 赤のプロットは 0.1 THz を入射した場合、緑のプロットは 0.102 THz を入射した時の結果を 示している。設計周波数より低い 0.098 THz の結果を見ると 1 mm 焦点距離が短くなってい ることが確認できる。逆に設計周波数より高い 0.102 THz を入射した結果を見ると 2 mm 焦 点距離が長くなっている。つまり THz-CSOL の焦点距離は周波数が低くなると短くなり、 高くなると長くなる。これは従来のガラスや樹脂のレンズでは屈折率の周波数依存性によ って、周波数が高くなると焦点距離が短くなる特性とは逆の現象である。THz-CSOL の場 合、入射するビームの周波数が小さくなるとスリットの幅に対して波長が長くなるため、 回折効果が強くなり焦点距離が短くなっていると考えている。

図 4. 8(b)は、入射ビームの周波数を 0.091 THz から 0.105 THz まで変化させたときのz = 70 mm における集光されたビーム幅とそれに対応するサイドローブ比を示している。赤の



図 4.8 THz-CSOL の周波数依存性、(a)同じ SOL に入射ビームの周波数を変えたときの 集光されたビーム幅比較(青:0.098 THz、赤:0.100 THz、緑:0.102 THz)、(b)0.091 THz から 0.105 THz まで入射ビームの周波数を変えたときのビーム幅とサイドローブ比 (SLR)比較(赤:集光されたビーム幅、シアン:SLR)

実線は集光されたビームの幅を示し、シアンの実線はサイドローブ比を表している。設計 周波数から離れるほど、集光されたビーム幅は広くなり、集光効率は悪くなる。このグラ フから、0.1 THz では集光ビーム幅とサイドローブ比がともに小さくなるように最適化され ている範囲に入っていることが確認できる。また、0.093 THz から 0.103 THz の範囲では、 サイドローブ比が 35%以下に収まっていることも分かる。さらに、0.093 THz から 0.102 THz の範囲では、焦点ビーム幅は 0.9λ 程度に留まっており、これは市販の IMPATT ダイオ ード等 CW の THz 光源の周波数帯域よりも十分に広い範囲で集光することが確認できた。

今回設計した THz-CSOL は広い周波数帯域に最適化されておらず、単一周波数でデザインを設計したが、最適化の際に複数の周波数による計算結果を用いることで、広い周波数帯域で集光ビームを生成できる SOL を設計することは可能であると考えている。

4.4 テラヘルツシリンドリカルスーパーオシレーションレンズの

製作

ここまでf = 70 mmの THz-CSOL 設計結果を使って THz-CSOL の特性を評価してきた。 ここで 0.1 THz 向けにf = 50 mm、 100 mm の THz-CSOL を新たに設計製作を行い、実験にて 評価を実施した。この2種の THz-CSOL の設計結果を図 4.9 に示す。図 4.9(a)、(b)がf = 50mm のレンズの設計結果、(c)、(d)はf = 100 mmのレンズの設計結果を示している。(a)、(c) はそれぞれのレンズのパターンの模式図であり、白い部分が THz 波透過部分、黒い部分が 不透過部分である。図 4.9(a)の焦点距離が短いほうがレンズ中心付近の白い部分(透過部分) の面積が大きい。また(b)、(d)はレンズ通過後の yz 平面の強度分布を表しており、(b)、(d) 各々の設計焦点距離付近で集光されている様子が確認できる。図 4.9(b)において焦点距離 z



図 4.9 設計した焦点距離が異なる 2 種類の THz-CSOL 計算結果、(a)、(b)f = 50 mm (16.6λ)の THz-CSOL、(c)、(d) f = 100 mm (33.3λ)の THz-CSOL、(a)、(c)設計した THz-SOL の模式図(黒い部分が不透過、白い部分が透過部)、(b)、(d)レンズ通過後の yz 平面の強度分布



図 4.10 製作した焦点距離の異なる 2 種類の THz-CSOL、 (a)焦点距離 f = 50 mm、(b)焦点距離 f = 100 mm

= 50 mm における集光されたビームの幅は 2.1 mm (0.74 λ) であり、回折限界の 0.86 倍を実現している。加えて DOF は 6 mm (2 λ) と目標数値 5 mm を超える。一方、図 4.9(d)でも焦点距離 100 mm 付近に集光されている様子が確認でき、こちらの集光されたビーム幅 3.2 mm (1.06 λ)、DOF = 18 mm とこちらもビーム幅、DOF ともに目標をクリアできていることが分かる。

これらのレンズをフォトリソグラフィで製作した写真が図 4.10 である。サイズ 150 × 150 mm、厚み 0.7 mm のガラス基板上に、100 × 100 mm のパターンを Cr を厚み 250 nm 蒸着して製作した。第 3 章で述べた同心円型、第 5 章で議論するメタマテリアル型の THz-SOL ではパターン製作に Au を使用したが、THz 波の透過/不透過領域を分けることができればいいため本レンズでは THz 波帯の表皮深さを考慮し Cr のみ 250 nm 蒸着することでレンズを製作した。

4.5 テラヘルツシリンドリカルスーパーオシレーションレンズの

集光性能評価の結果と考察

製作した2種のレンズを評価するために図 4.11の実験系を構築した。発振源に CW の 0.1 THz 発振源(TeraSense 社、IMPATT-Diode、出力 180mW)を用いている。本レンズで は第 3 章のレンズと異なり、直線偏光を使用するので、この発振源の先にホーンアンテナ を直接接続している。発振源と THz-CSOL の間にはビームコリメート用のテフロンレンズ を設置している。THz-CSOL の焦点位置に受信機を設置しており、受信機には 2 次元アレ



THz CW Source (TeraSense, IMPATT-Diode, 0.1 THz)



図 4.11 製作した THz-CSOL の評価に使用した実験系模式図

図 4.12 THz-CSOL 評価結果、(a)、(b) $f = 50 \text{ mm} \text{ } \sigma$ THz-SOL 評価結果、(c)、(d) $f = 100 \text{ mm} \sigma$ THz-CSOL 評価結果、(a)、(c)xy 平面の計測結果、(b)、(d)y = 9 pixel 上の x 軸方向 の強度分布

イの THz カメラ(TeraSense 社、Tera256、16 × 16 画素、1 画素のサイズ:1.5 × 1.5 mm)を 用いた。

図 4.12 はこの実験系を使った実験結果を示している。図 4.12(a)、(b)はf=50 mmの THz-CSOL の実験結果、(c)、(d)はf=100 mmの THz-CSOL の評価結果である。(a)、(c)はそれぞ



図 4.13 実験結果と計算結果の比較

れのレンズの焦点距離における強度分布計測結果であり、(b)、(d)は y = 9 pixel 上の x 軸方 向の強度分布を示している。(a)、(c) ともに x = 8 pixel 付近で強度が強くなり、集光してい る様子が確認できる。図 4.5(b)では y 軸方向に一様なのに対し、測定結果では強度勾配が あるのは実際の THz 波発振源の放射強度分布の影響だと考えられる。また図 4.12(b)から集 光されたビームの幅は 3.2 mm (1.05 λ)、図 4.12(d)より集光されたビームの幅は 3.6 mm (1.2 λ) となっており、これを計算結果と比較しているのが図 4.13 である。黄色の棒グラ フが計算結果、青色の棒グラフが実験結果を示し、黒の点線は計算で求めた回折限界の値 である。

実験結果と計算結果を比較すると、f = 50 mm、100 mm のレンズの測定結果共に計算結果 より大きくなっている。これは計算結果を求める際には計算ステップを 0.1 × 0.1 mm で行 っているのに対し、実験の結果は受信機の 1 pixel の大きさで計測できる空間的なサイズが きまってしまい、今回使用した装置の 1 画素サイズが 1.5 × 1.5 mm と計算に使用している ステップサイズより大きいことが影響していると考えられる。またf = 50 mm のレンズは計 算結果では回折限界を下回っていたものの、実験結果は回折限界よりも大きい。一方、f =100 mm のレンズは計算、実験共に回折限界を 11%下回っており、スーパーオシレーション の効果を確認、焦点距離も 33 λ であり Far-field な焦点距離という条件も満たしており、想 定した結果を確認できた。f = 50 mm のレンズ評価結果が計算結果と差があるのは、f = 100mm のレンズと比較してコリメート用の PTFE レンズとの距離が近いため、PTFE レンズ表 面からの反射光の影響を受けやすいためだと考えている。

4.6 まとめ

本章では THz-SOL をより広い分野で活用するため 1 軸方向にのみ集光するよう THz-CSOL を設計し、実験にてその特性を評価した。直線偏光の平行光を入射ビームとして、 大きさ 100 × 100 mm、単位領域幅 250 µm (λ /12) 、焦点距離 70 mm となるように BPSO に よりデザインを最適化した。結果、67.7 mm から 76.6 mm の間で集光することが確認でき、 焦点距離である z = 70 mm 地点にて集光されたビーム幅は 0.84 λ 、これは回折限界より 21% 小さく集光できている。また実効的な *NA* が 1.43、DOF が 3.3 λ であり、目標としていた3 つの条件(回折限界以下の集光、10 mm 以上の Far-field な焦点距離、5 mm 以上の長い DOF) を満たすことが確認できた。また f = 50 mm、100 mm の THz-CSOL も設計製作と評価を実 施しており、f = 100 mm を使った集光の結果回折限界よりも 11%小さなスポットへの集光 を確認することができた。

参考文献

- [1] A. Iba *et al.*, Sensors, **21**, 20, 6732 (2021).
- [2] T. Young, Phil. Trans. R. Soc., 92, 12-48 (1802).
- [3] Y. Kagoshima et al., J. Appl. Phys., 60, 118001 (2021).
- [4] Seiya Kawasaki et al., Appl. Phys. Express, 14, 046501 (2021).
- [5] A. S. Hajo *et al.*, in IEEE Access, **8**, 84116-84122 (2020).
- [6] C. F. Destefani et al., Phys. Rev. B, 106, 205306 (2022).

第5章 メタマテリアル型のテラヘルツスーパーオシ

レーションレンズの作製と評価

5.1 はじめに

第3、4章にてTHz-SOLがTHz波帯においても可視光・UV 同様にスーパーオシレーショ ンの効果を発現でき、目標の3つの要素(スポットサイズ、焦点距離、DOF)を満たすこ とができる技術であることについて述べた。第3章のTHz-SOLの場合1点の極小のスポッ トを生成するものであったため、高分解能な計測は可能な反面、計測できる範囲が狭い範 囲に限られてしまうという課題もあった。第4章のTHz-CSOLは線集光するため計測でき る範囲は広がるが1軸方向に限定される。本章では別のアプローチで1枚のレンズで同一 レンズ面内に複数の極小スポットを生成できるレンズを開発することで、THz-SOLの応用 可能性を広げることに取り組んだ。

5.2 微細な周期構造を利用したスーパーオシレーション効果に関

する先行研究

スーパーオシレーションを発生させるためには面内の強度分布に対し複数の空間周波数 成分を生み出す必要がある。第3章では同心円型のスリットを用いてこれを実現してきた が、先行研究では波長よりも小さなナノホールが並んだマスクや周期構造物をマスク面内 に設けることでスーパーオシレーション現象を発現している例もある[1-3]。Huang[1]は金 属上に使用する光の波長 660 nm と比べて非常に小さなナノホールを設けたマスクを使用し ている(図 5.1)。図 5.1(b)はそのマスクに光(波長 660 nm)を入射し、マスクから 7.52離 れた位置で計測した散乱光の様子である、(c)は(b)中の白枠内のスポットの強度分布を示し たものである。スポットの FWHM が 320 nm となっており、波長の半分以下のサイズに集 光できていることが分かる。このように第3章で使用した同心円型のパターン、第4章で 使用したラインアンドスペースのパターン以外でもスーパーオシレーションを発生させ、 回折限界以下への集光を実現させている。

また、同様にナノホールの代わりに波長より小さな構造物を周期的に配置し特殊な特性 を発現させる"メタマテリアル"を利用してもスーパーオシレーションの効果を発現するこ とができる。Roy は可視光向けに円形のスリットを複数並べたものを単位パターンとした メタマテリアル型の SOL について報告している[2]。このレンズは波長 800 nm をターゲッ トにして設計製作されており、このときのスポット径は 0.2λ と回折限界以下の集光ができ ていることが報告されている。この回折限界以下の集光ができているのはスリットの配置 によりスーパーオシレーション現象に由来していることについても述べられている。他に



図 5.1 ナノホールを利用したスーパーオシレーションによる集光[1]、(a)ナノホール マスクの SEM 画像、(b)マスクから 7.5λの距離の散乱光強度分布、(c)スポット強度分 布(bの白枠内)



図 5.2 メタマテリアル型スーパーオシレーションレンズ 1[2]、(a)レンズ SEM 画 像、(b)強度分布(実験結果)、(c)単位パターン毎のスポット強度分布



図 5.3 メタマテリアル型スーパーオシレーションレンズ 2[4]、(a)メタマテリア ル単位パターン、(b)単位パターンを同心円状に配置したレンズ

も Liao ら[4]は SiO₂ 基板の上にアモルファスシリコンで作製された直方体の構造をメタマ テリアルの単位パターンとし、この単位パターンを基板上に同心円状に配置することでス ーパーオシレーションを起こし実効的な *NA* = 0.89 のレンズを提案している。図 5.3(a)が メタマテレンズの単位パターン模式図であり(b)は単位パターンを同心円状に配置したレン ズの写真である。

5.3 メタマテリアル型テラヘルツスーパーオシレーションレンズ

のパターン設計

本研究では波長以下の矩形スリット、円形スリットを5個十字に配置したパターンを単 位パターンとしたメタマテリアル型のTHz-SOL製作に取り組んだ。矩形もしくは円形スリ ットを格子状に一定間隔で並べた場合、このパターンはバンドバスフィルタのように機能 する(図 5.4)[5]。Aliら[5]は図 5.4(a)のような矩形スリットを周期的に配置したパターン を使って THz 波帯のバンドパスフィルタを実現している。図 5.4(b)はパターンの寸法を(c) の表のように変化させたときの透過スペクトルを示しており、寸法によって透過する周波 数が変化している様子が分かる。このバンドパスフィルタはマスク全体に同じバターンが 配置されているためにこの機能が発現していた。しかし、このパターンの一部にあえて欠 けた部分を設けることで単位パターン上を透過した THz 波にマスク面内で位相の偏りを発 生させることが出来る[2]。この偏りによって単位パターン中央部を通過した THz 波に周囲 のスリットに対しての位相遅れを発生させ、これを利用することで単位パターン直上に集 光する効果を発現させる。所望のパターンを設計していくには単位パターンによる吸収損



Device	P (µm)	<i>L</i> (μm)	<i>w</i> (µm)	d (µm)	Tape	f_0 (THz)	Δf (THz)
S1	86	80	60	33	No. 5603	0.84	0.58
S2	70	66	48	33	No. 5603	1.00	0.77
S3	52	48	36	23	J0010 and No. 5601	1.46	0.86
S4	29	23	17	10	No. 5601	3.10	1.57
S5	28	24	16	10	No. 5601	3.17	2.02
S6	32	28	15	33	No. 5603	3.44	3.20

図 5.4 矩形スリット型メタマテリアルバンドパスフィルタ[4]、(a)メタマテリアルパタ ーン模式図、(b)寸法の異なるパターンによる透過スペクトル、(c)メタマテリアル寸法 パラメータ



図 5.5 メタマテリアル型 THz-SOL パターン模式図

失、有限サイズ、パターン間の相互作用という 3 つの要因が複雑に関係し合う。そのため 第 3 章、第 4 章と同様に設計することは困難なため、これらの課題を考慮して、メタマテ リアル型 THz-SOL を設計するために経験的組合せアプローチ[6]を用いて設計を行った。

スリット形状の影響、スリットの大きさ、幅、間隔が集光に与える影響を明確化するため、電磁界解析ソフトウェア HFSS を使用し、各パラメータについて有限要素法による計算を行った。単位パターンの周囲に周期境界条件を設け、複数のパターンが周期的に並んでいる状態でレンズ透過後の電場の分布・位相を計算している。

まずスリットの形状による違いを比較する。図 5.5 に矩形、円形それぞれのパターンの 模式図を示している。(a)は円形のスリットによって構成された単位パターン、(b)は矩形の スリットで構成された単位パターンであり、十字に5個のスリットを並べたものを単位パ ターンとしている。D は円形スリットの直径、矩形スリットの対角線であり、入射する THz 波 (0.1 THz)の波長 3 mm に対し十分に小さな 690 µm (0.23 λ)とした。またスリット の幅 w は 127.5 µm、スリット間の間隔 l は 1275 µm、単位パターン間の距離 A は 3l (3825 µm)として設計し、このマスクに円偏光の平面波を入射する設定で計算を行っている。

図 5.6 は円形スリット、矩形スリット、それぞれに THz 波を入射した場合の SOL の集光 性能を計算したものである。図 5.6(a)は矩形スリットを使用した計算結果、(b)は円形スリ ットを使用した計算結果である。両者を比較すると円形スリットを用いたほうがスポット の強度が高くなっており、透過・集光の効率が高いことが分かる。また図 5.6(b)は強度の 分布であったが、図 5.6(c)のグラフは位相の分布を示したものである。(b)にてレンズから の距離 8 mm、16 mm に確認できるスポットの前後で位相がマスク中央(x=0 mm)に向か って変化している様子が確認でき、集光している様子が位相の点からも確認することがで きる。

これらの計算結果からこのメタマテリアル型の THz-SOL は焦点距離の方向(レンズから 離れていく方向)に一定間隔で繰り返しスポットを生成するという、他のレンズにはない特



図 5.6 メタマテリアル型の THz-SOL 計算結果、(a)四角パターンの SOL を使用した場合の強度分布、(b)円形パターンの SOL を使用した場合の強度分布、(c)円形パターンの SOL を使用した場合の位相分布、(d)z 軸方向へのスポットサイズの変化(青:四角のパターン、赤:円形パターン)

徴を持っていることも分かる。図 5.6(d)は図 5.6(a)、(b)で確認できるスポットのサイズを 示したグラフであり、両者ともに *z* = 7.9 mm、15.8 mm にスポットが発生している。青のプ ロットが矩形スリットを使用して計算した結果、赤のプロットが円形スリットを使用した 時



図 5.7 単位パターン 9 個 (3 × 3)のモデルを使った有限要素法による強度分布計算結果

の計算結果である。このグラフを見るとスポットが確認できる *z* = 7.9 mm. 15.8 mm におい てスポットサイズはほぼ同じであり、スポットサイズに対してスリット形状の影響は小さ いことが確認できる。スポットサイズに差が無く、かつスポットの強度が高いため円形の ほうがレンズとしての性能が高いことが分かる。

図 5. 7(a)はレンズ直上から見たときの模式図、(b)は焦点距離 z = 7.9 mm における強度分 布を示している。単位パターンを 9 個並べたモデルに周期境界条件を設定し有限要素法で 計算した結果である。単位パターン単体のモデルに周期境界条件を設定し有限要素法で計 算した結果 (図 5. 6)同様の結果が得られており、面内は周期的なパターンになっている ことから、以降は単位パターン 1 個のエリアに限定して計算をしている。各単位パターン 直上に小さなスポットが複数生成されている様子が確認できる。

図 5.8 は円形スリットを用いた THz-SOL のスリット径、スリット幅、スリット間隔をそ れぞれ変化させたときのスポットの変化を計算・比較したものである。図 5.8(a)のグラフ がスリット径を図 5.5 で設計した値から-20 µm 変化させたとき、図 5.8(b)のグラフは+ 20µm 変化させたときのスポットの様子を計算したものである。(c)はこのときのスポット の大きさ、(d)は x=0上の強度をプロットしたものである。これらの結果からスリットの径 を大きくした方がスポットの強度が強くなるものの、スポットの発生位置、スポットサイ ズには影響をしないことが確認できた。

49



図 5.8 スリット径の変化による影響、(a)スリット径を 20 μ m 大きくした場合の強度 分布、(b)スリット系を 20 μ m 小さくした場合の強度分布、(c) *z* 方向に対するスポッ トサイズ、(d)*z* 方向に対する *x*=0、*y*=0上の強度分布

図 5.9 はスリットの幅を変化させた計算結果であり、図 5.9(a)のグラフがスリット幅を 20 µm 太く、図 5.9(b)のグラフが 20 µm 細くしたときの強度分布計算結果である。図 5.9(c) はスリット幅をそれぞれ変化させたときのスポット径を計算したグラフである。赤のプロ ットが 20 µm 細く、青のプロットが 20 µm 太くしたときの計算結果である。こちらもスリ ット径を変化させたときと同様に、スポットの強度は変化するもののスポット径・スポッ ト発生間隔は変化しなかった。

図 5.10 はスリット間隔を変化させた場合の計算結果である。図 5.10(a)の各グラフは左 から今回基準としているスリット間隔 1275µmに対して-50µm~+50µmまで 10µm刻 みに変化させて計算した強度分布、図 5.10(b)各条件におけるスポット径の変化を示してい る。スリット径、スリット幅ではスポットの発生間隔はほとんど変化しなかったが、スリ ット間隔の変化に応じて変化していることが分かる。スリット間隔が短くなるとスポット の発生間隔が短く、逆にスリット間隔が長くなるとスポットの発生間隔は広くなる。この ように本タイプの焦点距離はスリット間隔で設計できる。このスリット間隔による集光の



図 5.9 スリット幅を変化した時の影響、(a)スリット幅を 20 µm 太くした場合の強度 分布、(b)スリット幅を 20 µm 細くした場合の強度分布、(c)z 方向に対するスポットサ イズ



図 5.10 スリット間隔を変化した時の影響、(a)左から基準長さ $1275 \mu m$ に対して-50 $\mu m \sim +50 \mu m$ まで変化した際の強度分布、(b)各条件におけるスポット径の変(スポ ット径は波長 3 mm で規格化)

変化はタルボ距離で説明できる。タルボ効果とは波面がそろった可干渉光が周期的物体を 透過して特定の距離だけ伝播したときに、周期的物体と同じ自己像が形成される効果とし て知られている[7]。この特定の距離をタルボ距離と呼び、以下のように表すことができる。 $Z_T = \lambda/(1 - \sqrt{(1 - \lambda^2/a^2)})$ (19) a は格子定数(単位パターン間の距離)であり、スポットの繰り返し距離 Z_T はこの a と波 長 λ で表現できる。またこのレンズを透過し生成されたスポットの強度は、単位パターン の面積に対するスリットによる開口率が 31%、単位パターンに照射されるエネルギーのう ち、スポットに集まった割合は 7%であった。第3章の同心円型と比較すると、レンズ全面 の単位パターン毎にスポットを発生させるため、1 つあたりのスポット強度、集光効率は 低い。そのため計測には今回の評価で使用したベクトルネットワークアナライザのように 高感度な測定器が必要となる。

5.4 設計したメタマテリアル型テラヘルツスーパーオシレーショ

ンレンズの製作と性能の評価

本研究では 0.1 THz 向けにメタマテリアル型 THz-SOL の各寸法をスリットの直径 D=690 µm、スリット間距離 l=1275 µm、単位パターン間の距離 A=3875 µm、スリット幅 w=127.5 µm として製作を実施した。直径 101.6 mm、厚み 400 µm のガラス基板上に金の薄膜を厚み 300 nm 蒸着してパターンを作製した。図 5.11 はガラス基板の上に金とクロムが蒸着されて いる様子を示した断面模式図である。金の薄膜層で 0.1 THz の電磁波を完全に透過・非透 過の領域に分ける必要があるため、厚みは金の染み込み深さ 250 nm に対し余裕を持たせ 300 nm としている。金の薄膜層とガラス基板の間にはバッファ層としてクロム 10 nm を蒸



図 5.11 製作したレンズの断層構造模式図



図 5.12 製作したメタマテリアル型の THz-SOL、(a)製作したレンズの写真、(b)電子顕 微鏡による観察画像



図 5.13 評価系模式図

着している。図 5.12(a)は実際に製作したレンズの写真であり、(b)は電子顕微鏡で円形のス リットを拡大して確認した画像である。作成したレンズパターンの寸法を電子顕微鏡で確 認したところ、 $D = 681 \,\mu\text{m}$ 、 $w = 123 \,\mu\text{m}$ 、 $l = 1276 \,\mu\text{m}$ であった。Dが設計値よりも 9 μm 小 さいが、シミュレーション結果から集光したスポット径への影響は小さいことが予想でき るため、こちらのレンズを使って性能評価を実施した。

評価実験系の模式図が図 5.13 である。こちらの評価は第 3 章でも説明した実験系を用い て、z方向に繰り返し生成されるスポットの様子を計測した。プローブアンテナ先端に吸収 材料を設置しているが、第 3 章の同心円状のレンズの焦点距離(75 mm)に比ベメタマテ リアル型の THz-SOL は焦点距離が短いため(8 mm、16 mm)、プローブアンテナ先端で反 射した THz 波がレンズ表面で再度反射し干渉が起こりやすい。図 5.14 はこの干渉の影響に ついて計測結果と計算結果を比較したグラフである。図 5.14(a)は吸収材を設置しないで計



図 5.14 レンズ表面とプローブアンテナ間の干渉の影響、(a)吸収材なしで計測した結果、 (b)計算結果

測を行った結果を示しており、レンズから離れる方向(z方向)についての強度分布に急峻 な変化を確認することができる。これがレンズ表面とプローブアンテナ間の干渉によるも のである。図 5.14(b)は計算結果であり、レンズ表面とプローブアンテナ間の干渉は含まれ ていないため、滑らかな強度分布の変化をしていることが確認できる。そのため計測を行 う際は干渉が含まれないよう吸収材を設置する等の対策が必要となる。

図 5.15 は図 5.13 の評価系を使って評価した結果を示したものである。図 5.15(a)は THz-SOL 通過後の y=0 mm における xz 平面内の強度分布を示しており、数値は面内の最大強度 で規格化している。このグラフから z 軸方向に繰り返しスポットが生成されていることが 確認できる。1 つ目のスポット発生位置が z=8 mm、その次のスポットの発生位置が z=16mm 付近に確認できる。式(19)からタルボ距離を計算すると本レンズの場合 7.9 mm であり、 実験結果とよく一致、設計通りの結果が得られていることがわかる。この繰り返し生成さ れるスポットのサイズは回折限界よりも小さくなっており、スーパーオシレーションの効 果が発現していることを確認できた。図 5.16 にて詳しく述べる。

図 5. 15(b)は、z = 8 mmにおける x = 0 mm上の強度分布を青のプロットで表し、または y = 0 mm上における強度分布をオレンジのプロットで示している。この結果から、xy平面 からスポットを観測した場合、スポットが円形に集光していることがわかる。

図 5. 16(a)は計測結果から z 軸方向のスポット径の変化を示したものである。赤の実線は 有限要素法によって計算した結果、青のプロットは計測結果を示している。ここでスポッ トとして考慮するのは、少なくともスポット中心部の強度の 50%以上が残る領域と定義し た。図 5. 16(a)、(b)における灰色の領域は THz 波が集光されていない領域を示している。 図 5. 16(b)のグラフにおいて、z = 7.5 mm で集光されたスポットサイズは 2.01 mm である。 ただし計算結果(赤の実線)を見ると、ホットスポット間(灰色の領域)において THz 波 の強度が弱く、計測結果からは集光できていないように見える。これは計測に使用した受 信側プローブアンテナの開口部直径が 2.1 mm と、有限要素用の計算で用いた空間分解能



図 5.15 製作したレンズの評価結果、(a)レンズ通過後の xz 平面における強度分布、(b)xy 平面上の強度分布(青のプロット:x=0上の強度分布、オレンジのプロット:y=0上 の強度分布、赤の実線:計算結果)



図 5. 16 (a)z 軸方向に対するスポット径(青のプロット:実験結果、赤の実線:計算結果)、(b)z 軸方向に対する x = 0 mm 上の強度分布(青のプロット:実験結果、赤の実線:計算結果)

(0.01 µm) より大きいためと予想される。またこの灰色の領域は信号の強度自体も低く十 分な S/N 比を確保できていないことも原因と考えている。本 THz-SOL を製品検査等の実ア プリケーションで使用する際にはスポットの十分な SN が確保できるスポットの中央部分 を使用することになるため、この部分の影響は少ない。図 5.16(b)は z = 8 mm での強度で 規格化した x = 0、 y = 0 上の z 軸方向に対する強度分布で、赤線が計算結果、青のプロット が実験結果である。シミュレーションでは、第 1 のスポットの強度が第 2 スポットの強度 とほぼ同じであるが、実験結果では 2 番目のスポットの方がわずかに強くなっている。こ れは入射波に対してレンズがわずかに傾いているか、入射波の強度分布による影響だと考 えられる。有限要素法の計算は理想的な平面波に対して行っているが、実際に実験で使用 したビームの強度分布は正規分布となっているためである。

また、DOF もレンズの性能において重要なパラメータであり、これは図 5.16(b)から確認 できる。計測結果から求めた DOF は第 1 スポットが 2.3 mm、第 2 スポットが 2.2 mm であ る。これに対し、計算結果では第 1 スポットが 2.1 mm、第 2 スポットが 2.45 mm と両者で よく一致していることがわかる。

また図 5. 16(a)のグラフから、製作した THz-SOL では z = 8 mm 付近でスポットサイズが 2.01 mm (0.67 λ) であることも確認できる。回折限界が 2.46 λ であることから、本提案レン ズは従来のレンズによるスポットサイズの約 30%の集光を実現していることが確認できた。 計算上、z = 8 mm におけるスポット径は 0.65 λ であり、計測結果とよく一致している。

このように、0.1 THz 用に作製した THz-SOL では、従来のレンズと同等の DOF を維持し ながら、回折限界を超えて集光できるレンズであることを実験により確認することができ た。

56



図 5.17 入力周波数による集光への影響、(a)計算結果(0.097 THz)、(b)計算結果(0.103 THz)、(c)実験結果(0.097 THz)、(d)実験結果(0.103 THz)

次に本レンズの周波数依存性について述べる。このレンズの特性上、焦点サイズと焦点 距離は入射ビームの周波数に影響を受ける。本レンズは 0.1 THz を対象として設計されて いるが、一般的な THz 波帯の発振器(共鳴トンネルダイオードやショットキーバリヤダイ オード)は単一の周波数ではなく、ある程度広がりを持った周波数の THz 波を放射してい る[8,9]。ここでは 0.1 THz 用に設計したレンズに対し設計周波数と異なる周波数の THz 波 を入射した場合の集光能力への影響を評価した。図 5.17(a)は 0.097 THz、(b)は 0.103 THzの ビームがレンズを通過した後の強度分布を有限要素法にて計算したものである。スポット 間距離は図 5.17(a)では 7.5 mm、(b)では 8.35 mm である。これらに対して図 5.17(c)は 0.097 THz のビーム、(d) は 0.103 THz のビームがレンズを通過した後の強度分布を実験で確認し たものである。図 5.17(a)と(c)、(b)と(d)を比較するとスポットの発生位置はよく一致して



図 5.18 メタマテリアル型 THz-SOL のスポット発生間隔と入射する周波数の関係

いることがわかる。図 5. 18 はスポット間距離の周波数依存性を比較したグラフになってい る。黒の実線が式(19)のタルボ距離の式をもとに算出した計算結果、赤い四角が有限要素 法で計算した結果、緑の丸は実験結果を示している。これら 3 つの結果から実験結果と計 算結果でよく一致していることが確認できる。この特性を使えば THz-SOL ではあえて入射 する周波数を変えることで焦点位置の調整に利用することもできる。

5.5 まとめ

本章では複数カ所を同時に高分解能で計測するための THz-SOL 開発について述べた。 レンズと垂直な方向に繰り返しホットスポットを生成するメタマテリアルベースの THz-SOL を 0.1 THz 向けに設計・作製し、その性能を実験的に実証することに成功した。直径 101.6 mm、焦点距離 7.5 mm のこのレンズは、THz 波を直径 0.67λの小さなスポットに集光 し、従来のレンズの回折限界2.46λよりも小さな領域に集光できることを実験・計算の両面 から示した。本提案レンズで使用したのは直径 127.5 µm の円形スリットを 5 つ組み合わせ た 3875 × 3875 µm の単位パターンである。本提案 THz-SOL は、従来のレンズよりも大幅に 高い解像度と 2λ 以上(Far-field)の焦点距離を実現するだけでなく、複数のスポットに同 時に THz 波を集光できる。さらに本提案 SOL は入射する周波数の THz 波を変えて焦点距 離を変えることができ、提案レンズの設計を変更することなく焦点距離を容易に調整する こともできる。この提案レンズは、回折限界以下の集光サイズ、10 mm 以上の長く調整可 能な焦点距離が実現できている。ただし DOF については 2.3 mm と目標の 5 mm を達成でき ていないこと、スポットの集光効率は同心円型と比較すると低いことから、実用化の際に は S/N 比を確保する工夫が必要となることも明確にした。しかし、レンズ面内に生成され る複数のスポット毎に受信機を設置すれば同時に多点計測することも可能というユニーク な特徴もあり、用途に合わせて使い分けていくことが重要である。

参考文献

- [1] F. M. Huang et al., Appl. Phys. Lett., 90, 91119, 1-3 (2006).
- [2] T. Roy *et al.*, Opt. Express, **21**, 6, 7577 (2013).
- [3] A. Nagarajan et al., Opt. Express, 27, 20012-20027 (2019).
- [4] D. Liao et al., Photon. Res. 10, 8, 1924-1930 (2022).
- [5] A. Maleki *et al.*, Photon. Res., **11**, 4, 526-532 (2023).
- [6] E. Plum *et al.*, J. Opt. **13**, 5, 055102 (2011).
- [7] H. F. Talbot Philos. Mag. Lett., 9, 56, 401-407 (1836).

- [8] D. Horikawa et al., Semicond. Sci. Technol. 33, 114005 (2018).
- [9] T. Suzuki *et al.*, in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, **47**, 9, 1649-1655 (1999).

第6章 総括

本研究においては、THz 波計測における課題であった分解能向上のための回折限界以下の 集光を実現する手段について研究に取り組んだ。THz 波計測をより普及させ、実用的にし ていくためには回折限界以下の集光だけではなく、長い焦点距離、DOF も重要であり、こ ちらも条件として満たすような集光コンポーネント開発に取り組んできた。THz 波用集光 コンポーネントとして、回折限界以下の分解能、10 mm 以上の Far-field の焦点距離、5 mm 以上の長い DOF の 3 つの目標を満たすことができる技術として、本研究では顕微鏡用途で 可視光や UV 向けに研究されていた SOL に着目し、THz 波帯での応用に取り組み、様々な 用途を想定して形状が異なる 3 種類のレンズを開発し、全てにおいて THz 波帯で回折限界 以下の集光ができることを計算・実験の両面から実証を行った。以下に本研究で得られた 主要成果を記述し、今後の展望について言及を行い総括とする。

- (1) 同心円型の金属パターンを用いて SOL を THz 波帯向けに製作、評価を実施し、THz 波 帯でも他周波数帯と同様にスーパーオシレーション効果を発現し、回折限界以下の集 光が実現できることを確認した。また焦点距離、DOF についても目標を達成している ことが確認できた。加えて、このレンズ使用時の計測分解能を評価するため、金属パ ターンに幅の異なるスリットを設けた評価用サンプルを使って計測したところ 1.5 mm (0.5λ)の性能があることを確認できた。本レンズに入射したエネルギーのうちスポ ットに集まるのは 15.7%。
- (2) THz-SOL の実用性を広げるため、1軸方向に集光するレンズパターンを設計製作し、 評価を実施した。ラインアンドスペースの金属パターンを用いて、パターンの長手方 向と直行する方向に偏光を持つ THz 波を入射することで、パターンの短手方向に対し て集光できる計算結果が得られており、その幅も回折限界以下であること計算結果を 得た。入射したエネルギーのうちスポットに集まるのは 25.5%。またこのとき実効的 な *NA* を算出すると 1.43 と従来レンズ以上であり、DOF は 3.3λ と従来レンズを超える 性能が確認できている。実際に *f* = 50、100 mm の THz-CSOL を製作し、実験の結果か ら回折限界を超える集光能力があることを確認できた。
- (3) スーパーオシレーションは様々なパターンを用いて発現することができ、ここではメタマテリアルの技術を使い波長以下のパターンを周期的に並べることで、レンズ面内に複数の極小のスポットを生成することができるレンズを開発した。この特徴を生かせばレンズ面内において複数点を同時に計測することも可能である。また、同心円型と異なり、スポットが焦点距離方向に繰り返し発生するというユニークな特徴もあり、この繰り返し発生する間隔をタルボ効果で説明できることを実験、計算の両面から確認した。この繰り返しスポットが発生する特性を生かせばレンズを再設計しなくても他生の焦点距離の調整も可能である。本研究では回折限界の 0.27 倍のスポットサイズ、16 mmの焦点距離、を達成できることを確認したが、DOF = 2.1 mmと目標の5 mmを少し下回っている。本レンズに入射したエネルギーのうちスポットに集まるのは 7.0%。

実際にメタマテリアル型の THz-SOL を使った計測をするときには、この点注意し計測 対象の動きを抑制する・停止させるといった工夫が必要になることも明らかになった。

以上のように特徴の異なる3つの THz-SOL について設計製作・評価を行ってきた。今回 作製した(1)と(2)のレンズを比較すると、(1)のほうが焦点サイズは小さく集光効率は高 い。SOL はスリットの長手方向と直行する方向の偏光成分のみが透過し、偏光と同じ方向 に集光する性質を持っている。同心円型の場合は円偏光を入射しており、スリットの長手 方向とちょうど直交する方向からわずかにずれた成分もパターンに入射され透過し、散乱 する。これらを含めてレンズ透過後の強度分布を計算し、レンズパターンを最適化するた め単純なラインアンドスペース型のデザインである(2)よりも設計の幅が広く集光効率の高 い設計ができるのだと考えている。しかし、(1)は微小な1点に集光するため1度で計測可 能な範囲が狭く、面で計測したい場合には被計測物を移動させる等の工夫が必要になる。 その点、(2)は1軸方向に対しては一度に集光・照射できるため THz ライン・エリアカメラ を用意すれば一度に1軸方向にスキャンすることが可能である。また被計測物を集光と同 じ方向に移動させれば被計測物全体をスキャンすることができる。実用化において、用 途・条件に合わせて(1)、(2)を使い分けることが重要となってくる。一方、(3)のメタマテ リアル型は(1)、(2)と比較すると、レンズ面内に複数のスポットを生成し、かつ焦点距離方 向に繰り返しスポットが生成されるという少し特殊な特徴を持っている。例えば、被計測 物上の定められた複数の点を継続してモニタリングしたい場合などは(3)のレンズが活用で きる。しかし、入射したエネルギーが生成された複数のスポットに分散してしまうため、 (1)、(2)のレンズと比較すると1つ当たりのスポット強度は弱い。そのため被計測物からの 透過強度または散乱強度のシグナルが小さくなってしまう。この点も(3)のレンズ活用時に は考慮しなければいけない。このように各レンズとも異なる特徴を持っており、よく理解 したうえで用途に合わせて活用することが THz-SOL を実用化するために重要な点である。

最後に、これまであまり注目されてこなかった THz 帯のスーパーオシレーションという 手法に着目してきたが、回折限界以下のスポット、10 mm 以上の焦点距離、5 mm 以上の DOF を満たすことのできる THz 波帯の強力な集光コンポーネントとしてのポテンシャルが 確認できた。一方で透過率については金属のマスクでロスする部分が生じるため高い S/N 比を求められる計測対象に対しては改善が必要だと考えている。SOL の透過性能は金属パ ターンの開口率で決まり、提案レンズは集光効率が 20%程度と従来レンズに比べると効率 が低い。この点については SOL のパターンを不透過・透過の 2 値ではなく複数の透過率の 領域を作り最適化することで改善できると考えている。またこれまでは最適化をレンズ通 過後の強度を用いて行ってきたが、位相に着目してデザインを最適化することでより透過 率を改善できると考えている。これらに取り組むことでさらに THz-SOL の適用範囲が広が り、THz 波計測の普及を加速できると考えている。

研究業績

原著論文

- <u>A. Iba</u>, C. W. Domier, M. Ikeda, A. Mase, M. Nakajima, A. V. Pham, and N. C. Luhmann, "Subdiffraction focusing with a long focal length using a terahertz-wave super-oscillatory lens", Opt. Lett., 46, 19, 4912-4915 (2021).
- <u>A. Iba</u>, M. Ikeda, V. C. Agulto, V. K. Mag-Usara, and M. Nakajima, "A Study of Terahertz-Wave Cylindrical Super-Oscillatory Lens for Industrial Applications", Sensors, 21, 20, 6732 (2021).
- <u>A. Iba</u>, M. Ikeda, V. C. Agulto, V. K. Mag-Usara, and M. Nakajima, "Sub-diffraction Focusing using Metamaterial-based Terahertz Super-oscillatory Lens", Appl. Sci., 12, 24, 12770 (2022).

国際会議、シンポジウム発表 (口頭発表)

- A. Iba, M. Ikeda, M. Nakajima, "Study of Sub-diffraction focusing using terahertz superoscillatory lens", JSAP-OSA Joint Symposia, Nagoya, Japan, August 26, 12p_N405_6 (2021).
- [2] <u>A. Iba</u>, M. Ikeda, V.C. Agulto, V. K. Mag-Usara, and M. Nakajima, "Sub-diffraction focusing with THz super-oscillatory lens", The Third International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT2022), Fukui, Japan, November 16-18, Fr2-2 (2022).

謝辞

本研究を進め、また本論文をまとめるにあたり常に適切な御助言ならびに丁寧な御指導 をしてくださいました大阪大学 レーザー科学研究所 中嶋誠准教授に心より感謝します。

また本論文をまとめるにあたって、懇切丁寧なご指導・ご教授を賜りました大阪大学レ ーザー科学研究所 吉村政志教授、大阪大学大学院工学研究科 蔵満康浩教授に深くお礼申 し上げます。

また在学中ご指導いただいた大阪大学大学院工学研究科電気電子情報通信工学専攻の先 生方、上田良夫教授、兒玉了祐教授、舟木剛教授、高井重昌教授、牛尾知雄教授、村上匡 且教授、巽啓司准教授、羽原英明准教授、尾崎典雅准教授、加藤裕史准教授、中田芳樹准 教授、長友英夫准教授、沈迅助教、福永崇平助教、和田有希助教、安部勇輝助教、伊庭野 健造助教、中村浩隆助教、橋本和宗講師、井渕貴章講師、Lee Heun Tae 講師にも深く感 謝いたします。

本研究の論文投稿に関して丁寧にご指導いただいた Verdad C. Agulto さん、Valynn Katrine Mag-usara さんに深く感謝いたします。

本研究の実験を行うにあたり親身にご協力いただいたカリフォルニア大学デービス校 Davis Millimeter Research Center の Luhmann 教授、Pahm 教授、Calvin W. Domier さんに深く 感謝いたします。

また本研究を行う機会を作っていただいた旭化成株式会社 生産技術本部 田川克志前本 部長、岡田慎一本部長、生産技術センター 北田 敏夫 前センター長、センシング技術部 内 山隆平前部長、池田誠人課長に深く感謝いたします。

このほか、多くの方にご指導ご協力を賜りました。深く感謝の意を表します。 最後にこの研究の遂行ならびに論文の執筆にあたり、常に応援し支えてくれた妻の葉 子、娘の楓に感謝いたします。

> 2024年2月 射庭 彩人

63